

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

Návrh měřicí hlavice pro měření teploty optickým vláknem  
Design of Scanning Head for Temperature Measurement with Optical  
Fiber

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Petr Závodný**

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Návrh měřicí hlavičky pro měření teploty optickým vláknem  
Design of Scanning Head for Temperature Measurement with Optical Fiber

Zásady pro vypracování:

Indexy lomu jsou materiálové parametry, které mimo jiné závisí na teplotě. Tím na teplotě závisí všechny parametry optického vlákna, které mají souvislost s velikostí indexu lomu jádra a pláště. Na základě této skutečnosti proveďte:

1. Přehled metod, pomocí kterých je možno měřit teplotu optickými vlákny
2. Realizujte několik funkčních modelů senzorů teploty s různě zakřivenými optickými vlákny
3. Proveďte měření propustnosti zakřivených optických vláken v závislosti na teplotě.
4. Analyzujte dosažené výsledky a porovnejte je s dosud známými.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] Yin, S., Ruffin, P.B., Yu, F.T.S.: Fiber Optic Sensors. CRC Press, FL, USA, 2008, ISBN 978-1-4200-5365-4

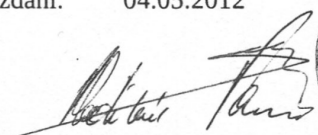
[2] Higuera, J.M.L.: Handbook of Optical Fiber Technology. J.W. and Sons. New York, 2006, ISBN 0-471-82053-9

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

  
prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.  
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 3.4. 2012

A handwritten signature in dark ink, appearing to be a stylized 'Z' followed by a horizontal line.

## Poděkování

Rád bych poděkoval prof. RNDr. Vladimíru Vašínkovi, CSc. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

## Abstrakt

Tato práce se zabývá zkoumáním teplotních vlivů na přenosové vlastnosti telekomunikačních vláken a jejich možné využití pro měření teploty. Jsou zde prezentovány výsledky série měření zkoumající chování různě zakřivených optických vláken při zahřívání v rozmezí teplot 30 °C až 90 °C. Teplotní vliv byl zkoumán z pohledu změny profilu svazku a z pohledu změny útlumu vlákna. Měřením byla zjištěna slabá teplotní závislost měřených vláken, která způsobuje mírné zvětšení numerické apertury a mírné snížení útlumu vlákna.

## Klíčová slova

Měření, měření teploty, zakřivená vlákna, ohyb vlákna, index lomu, termooptický jev, profil svazku, měření optického výkonu, optická vlákna, jednovidová vlákna, mnohavidová vlákna, numerická apertura.

## Abstract

This thesis examines effect of the temperature on the transmission characteristics of telecommunication fibers and their possible use for temperature measurement. We present the results of the measurement, that investigate the behavior of variously curved optical fibers when it was heated to the temperatures from 30 ° C to 90 ° C. Temperature effect was studied from the viewpoint of the beam profile change and variation of a fiber attenuation. There was observed slight dependence on the temperature on measured fibers, which caused increase in numerical aperture and reduction in fiber's attenuation.

## Key words

Measurement, measurement of temperature, curved fibers, fiber bend, refraction index, thermoptic effect, beam profile, optic power measurement, optic fiber, singlemode fiber, multimode fiber, numerical aperture.

## Seznam použitých symbolů, zkratek a termínů

a.u.	Libovolná jednotka (Arbitrary unit)
AD	Analogově digitální převodník
CCD	Elektronický obrazový snímač (Charge-Coupled Device)
CW	Kontinuální vyzařovací mód laseru (Continuous Wave)
dB	Decibel
dBm	Decibel nad miliwattem
DTS	Distribuovaný systém měření teploty (Distributed Temperature Sensing)
EFPI	Extrinzitní Fabry Perot Interferometr
FBG	Vláknová Bragovská mřížka
FFPI	Intrinsitní Fabry Perot Interferometr
FPI	Fabry Perot Interferometr
FWHM	Průměr v polovině maxima (Full Width at Half Maximum)
IR	Infračervená oblast
LPFG, LPG	Braggovská mřížka s dlouhou periodou
OTDR	Optický reflektometr (Optical time-domain reflectometer )
SLED	Super luminiscenční LED (Superluminescent Light Emitting Diodes)
SWI	Vlnovou délkou rozmítaný interferometr (Swept Wavelength Interferometry)
UV	Ultrafialová oblast
WGM	Whispering Gallery mode

# Obsah

1 Úvod.....	1
2 Přehled metod měření teploty optickými vlákny.....	2
2.1 Fabry-Perot interferometr.....	2
2.1.1 Intrinsitní FPI.....	4
2.1.2 Extrinsitní FPI.....	5
2.2 Mřížkové vláknově optické senzory.....	6
2.2.1 Principy snímání teploty.....	7
2.2.2 FBG teplotní senzory .....	9
2.3 Mřížkové vláknově optické senzory s dlouhou periodou.....	10
2.3.1 Principy snímání teploty.....	10
2.3.2 LPFG senzory s vysokou teplotní citlivostí.....	11
2.4 Měření teploty s využitím zpětného rozptylu.....	12
2.4.1 Metody založené na Rayleighově rozptylu.....	12
2.4.2 Metody založené na Ramanově a Brillouinově rozptylu.....	13
3 Modely senzorů teploty s různě zakřivenými optickými vlákny.....	15
3.1 Vliv změny indexu lomu vlákna.....	15
3.2 Vliv zakřivení vlákna.....	16
3.3 Měřené modely zakřivení.....	18
4 Metodika měření.....	19
4.1 Ztráty ve vláknech.....	19
4.2 Profil svazku.....	20
5 Výsledky měření propustnosti vlákna.....	22
5.1 Referenční měření při konstantní teplotě.....	22
5.1.1 Profil svazku.....	22
5.1.2 Výkon ve vláknu.....	24
5.2 Profil svazku 1550 nm.....	26
5.3 FWHM 1550 nm.....	30
5.4 Výkon ve vláknu 1550 nm.....	32
5.5 Profil svazku 1310 nm.....	34
5.6 FWHM 1310 nm.....	38
5.7 Výkon ve vláknu 1310 nm.....	40
5.8 Profil svazku 974 nm.....	42
5.9 FWHM 974 nm.....	44
5.10 Výkon ve vláknu 974 nm.....	45
6 Závěr.....	46
7 Použitá literatura.....	47
8 Přílohy.....	1



# 1 Úvod

Optická vlákna běžně používaná pro telekomunikační účely jsou tvořena dvěma válcovými vrstvami skla (jádreem a pláštěm). Tyto dvě vrstvy skla jsou z optického hlediska charakterizovány svými indexy lomu, přičemž pro dosažení vlnovodného efektu optického vlákna platí, že index lomu jádra je větší než index lomu pláště. Právě index lomu je jedním z klíčových parametrů optického vlákna. Určuje většinu jeho základních přenosových vlastností jako jsou například útlum, disperze a citlivost na ohyby. Stejně jako všechno v přírodě, je i index lomu (mimo jiného) závislý na teplotě. Se změnou teploty dochází k jeho změně, a tím zákonitě i ke změně všech vlastností jádra a pláště optického vlákna, které jsou jím definovány.

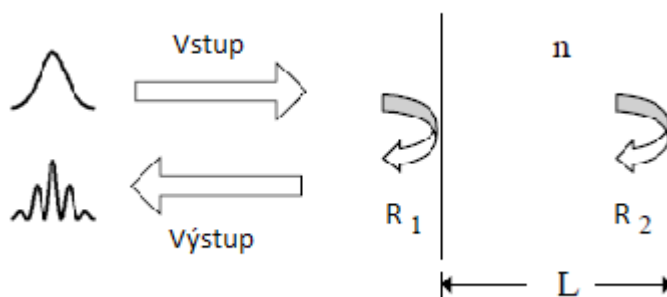
V úvodních kapitolách jsou představeny některé z nejpoužívanějších dostupných metod pro měření teploty pomocí optického vlákna. Po bližším zkoumání je patrné, že všechny popsané metody mají společné jedno, a sice to, že změna indexu lomu, k níž s teplotou dochází, je základní jev, který indukuje změnu přenosových vlastností vlákna. Tyto změny jsou následně měřeny a interpretovány jako změna teploty. Jednotlivé metody měření se pak liší ve způsobu, jakým je dosaženo zesílení vlivu změny indexu lomu na přenosové vlastnosti vlákna a následným detekováním a vyhodnocováním těchto změn.

Na základě těchto informací bylo navrženo několik senzorů sestavených z různě zakřivených jednovidových a mnohavidových vláken. Vláknem byla zakřívována v různých poloměrech z důvodu zkoumání vlivu ohybu na teplotní projevy vlákna. Zakřivená vlákna byla podrobena zahřívání v rozmezí teplot od 30°C do 90°C a následně u nich byly měřeny změny v přenosových vlastnostech. Přenosové vlastnosti vláken (propustnost) byly měřeny jednak z pohledu prostorového rozložení výkonu vyzařovaného z vlákna pomocí měřiče profilu svazku, a pak také z pohledu změny výkonu vystupujícího z vlákna za pomoci měřiče výkonu.

## 2 Přehled metod měření teploty optickými vlákny

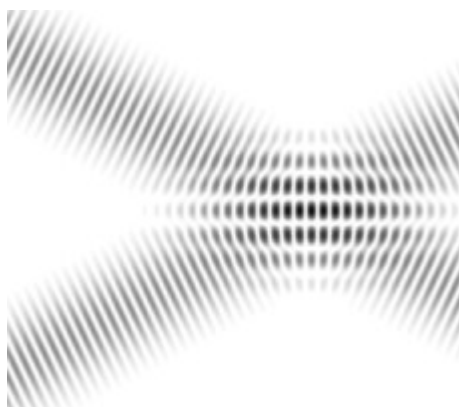
### 2.1 Fabry-Perot interferometr

Fabry-Perot interferometr (FPI) se skládá (Obrázek 2.1) ze dvou rovnoběžných rovinných zrcadel o odrazivosti  $R_1$  a  $R_2$  oddělených dutinou o délce  $L$ , která tvoří dutinu oscilátoru. Dutina je tvořena homogenním prostředím s indexem lomu  $n$ .



Obrázek 2.1: Schématický obrázek Fabry-Perot interferometru

Světelné paprsky vstupující dovnitř dutiny oscilátoru se odráží od zrcadel a dochází mezi nimi ke konstruktivním a destruktivním interferencím. Výstupem z interferometru jsou pak interferenční obrazce (Obrázek 2.2) složené z interferenčních proužků tzv. fringes. Interferenční proužky tvoří výkonová maxima a minima (Peak and Valley). Pokud mají dvě odražené světelné vlny stejnou fázi, jejich amplitudy se sečtou (konstruktivní interference) a vznikne interferenční maximum. V opačném případě dojde k destruktivní interferenci a vzniká pokles.



Obrázek 2.2: Interferenční proužky

Zrcadla oscilátoru lze popsat odrazivostí a propustností  $T_1$ ,  $T_2$  a  $R_1$ ,  $R_2$ . Pokud zanedbáme ztráty na zrcadlech způsobené absorpcí a rozptylem, lze odrazivost  $R_{FP}$  a propustnost  $T_{FP}$  FPI popsat následujícími vztahy[2]:

$$R_{FP} = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \Phi}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \Phi} \quad (2.1)$$

$$T_{FP} = \frac{T_1 T_2}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \Phi} \quad (2.2)$$

kde  $R_{FP}$  vyjadřuje poměr odraženého výkonu ke vstupujícímu výkonu do FPI, obdobně  $T_{FP}$  vyjadřuje poměr přeneseného světla ke vstupujícímu a  $\Phi$  vyjadřuje fázový posuv po zpětném průchodu interferometrem a lze jej definovat jako:

$$\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \quad (2.3)$$

kde  $L$  je vzdálenost zrcadel,  $n$  je index lomu prostředí mezi zrcadly a  $\lambda$  je vlnová délka světla (ve vakuu). K této hodnotě je potřeba započítat fázový posuv způsobený odrazem od rovinného zrcadla.

K celkovému popisu vlastností FPI se používá parametr jemnost (Finesse) značený  $F$ . Jemnost udává počet rozlišitelných spektrálních čar a je definována jako poměr rozdílů fází přilehlých interferenčních proužků ku průměru v polovině maxima (FWHM – full width half maximum) interferenčního proužku. Vztah popisující jemnost FPI v závislosti na odrazivosti  $R$  (uvažujeme stejnou odrazivost zrcadel) je dán:

$$F = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R} \quad (2.4)$$

Pro účely měření teploty se využívá dvou jevů, termooptického (způsobuje změnu indexu lomu  $n$ ) a délkové teplotní roztažnosti materiálu vlákna (způsobuje změnu délky  $L$  dutiny FPI). U intrinsitních senzorů, jejichž dutina je tvořena vláknem, převažuje vliv termooptického jevu, který je o řád větší než délková teplotní roztažnost vlákna. Pokud si tyto poznatky promítneme do vzorce (2.3) a budeme předpokládat, že vlnová délka světla vstupujícího do FPI je konstantní, projeví se změna indexu lomu  $n$  a  $L$  jako fázový posun světla procházejícího FPI.

Z hlediska konstrukce dutiny se rozlišují dva základní druhy interferometrů:

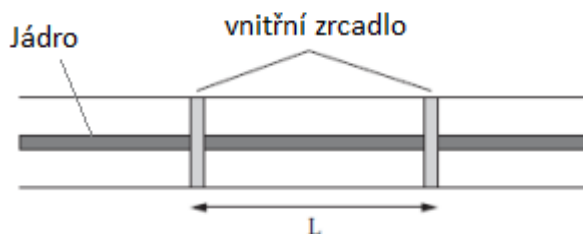
- extrinsitní,
- intrinsitní.

U konstrukcí intrinsitních senzorů (FFPI) je dutina mezi zrcadly tvořena samotným materiálem optického vlákna. V případě skupiny extrinžitních (EFPI) senzorů je dutina tvořena materiálem jiným, než je vlákno, nejčastěji vzduchem, případě jinou pevnou látkou.

### 2.1.1 Intrinsitní FPI

Nejjednodušší způsob vytvoření dutiny FFPI je, když jedno zrcadlo vznikne zalomením jednoho konce vlákna (využívá se zde Fresnelova odrazu, který vzniká na přechodu vlákno - vzduch), a druhé zrcadlo je v potřebné vzdálenosti od zalomeného konce vytvořeno uvnitř vlákna.

Další velice používanou konstrukcí je senzor tvořený zrcadly umístěnými uvnitř vlákna (Obrázek 2.3), takže prostor okolo zrcadel je tvořen vláknem. Obdobou této metody je varianta se stejně umístěnými zrcadly ve vlákně, jako v předchozím případě, ale s tím rozdílem, že zrcadla jsou tvořena Braggovskými mřížkami. Výhodou těchto konstrukcí jsou jejich kompaktní rozměry, které umožňují vytvořit bodové senzory vhodné pro zabudování přímo do kompozitních materiálů.



Obrázek 2.3: Umístění zrcadel v případě intrinsitní konstrukce

Vnitřní zrcadla lze vytvářet jako diskontinuitu indexu lomu. Toho lze dosáhnout záměrně nekvalitními sváry mezi dvěma čistými vlákny, nebo svařením čistého vlákna a vlákna, jehož konec je potažen tenkou vrstvou dielektrika nebo kovu. Jako nejlepší se ukazují zrcadla vytvořená z vrstvy dielektrika, pro jejich velmi dobré mechanické vlastnosti, nízké optické ztráty a široký možný rozsah odrazivosti.

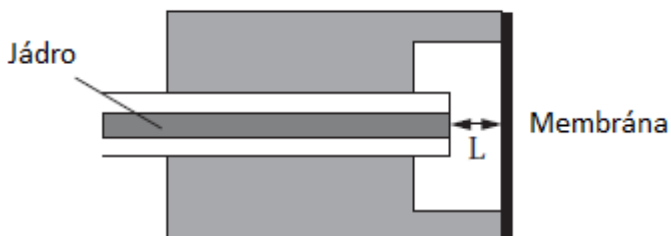
Nejběžněji používaným materiálem pro vytváření zrcadel je  $\text{TiO}_2$  (index lomu 2,4). Vrstva  $\text{TiO}_2$  se vytváří magnetronovým napařováním, nebo napařováním elektronovým paprskem. Typická tloušťka vrstvy je okolo 100 nm. Svařování se provádí pomocí slabého výboje s délkou pulsu jako u normálního sváru. Odrazivost zrcadel se určuje počtem svářecích pulsů. Odrazivost klesá s rostoucím počtem pulsů. Tímto způsobem lze dosáhnout odrazivosti od 1 do 10%.

### 2.1.2 Extrinsitní FPI

Dutiny jsou konstruovány jako vzduchové mezery, které jsou tvořeny diskontinuitami mezi dvěma vlákny uzavřenými v kapilární trubici, nebo krátkým úsekem dutého vlákna, vzniklého přerušením jádra. Další využívanou konstrukcí zobrazenou na obrázku (Obrázek 2.4) je vzduchová dutina ohraničená z jedné strany zalomeným vláknem a z druhé strany odrazivou membránou citlivou na měřenou veličinu (např. teplotu, tlak).

Extrinsitní senzory jsou citlivé na změnu délky vzduchové mezery oscilátoru. Protože dutina v EFPI je tvořena většinou vzduchem, nebo látkou s indexem lomu odlišným od jádra vlákna, je světlovodný efekt dutiny špatný a způsobuje velký útlum. Z tohoto důvodu je použitelná velikost dutiny omezena na několik stovek mikrometrů.

Extrinsitní senzory mají většinou větší rozměry ve srovnání s intrinsitními senzory.

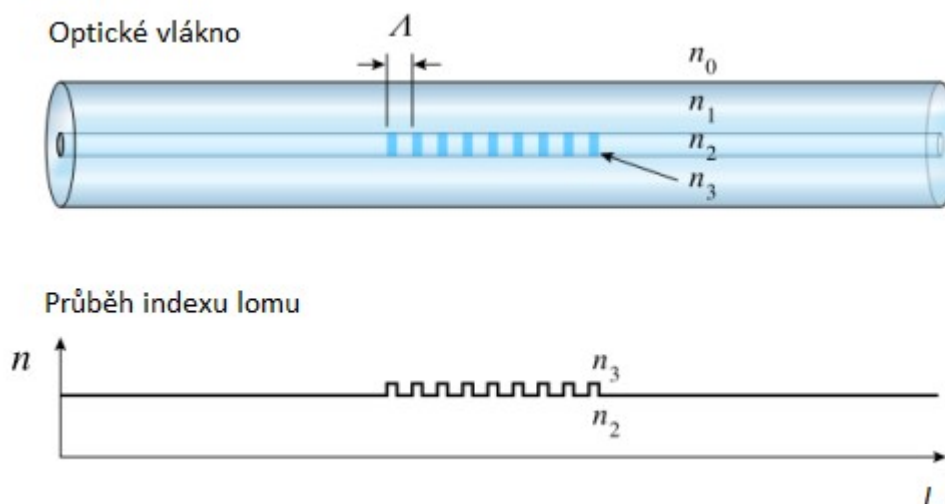


Obrázek 2.4: Umístění zrcadel v případě extrinsitní konstrukce

## 2.2 Mřížkové vláknové optické senzory

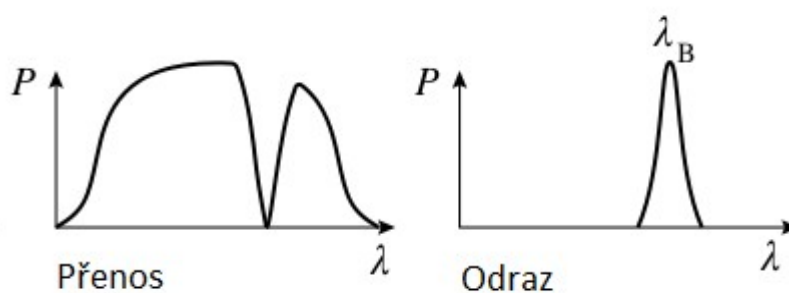
Senzory založené na Braggovské mřížce (FBG) patří v současnosti k velmi populárním díky velmi dobré dostupnosti a jejich širokému uplatnění nejen pro měření teploty.

Na obrázku (Obrázek 2.5) je schématicky znázorněna typická Braggovská mřížka. Mřížka je část jádra vlákna s pravidelně se střídající hodnotou indexu lomu (tzv. modulace indexu lomu).



Obrázek 2.5: Znázornění průběhu indexu lomu vlákna s Braggovskou mřížkou.

Typická spektrální charakteristika FBG je zobrazena na obrázku (Obrázek 2.6). Můžeme na něm pozorovat výřez ve spektru světla po průchodu mřížkou. V opačném směru je vidět odraženou (odfiltrovanou) vlnovou délku, která se šíří zpět vláknem.



Obrázek 2.6: Spektrální chování FBG (Filtr)

Braggovská mřížka se chová jako vysoce selektivní filtr typu pásmová zadrž (nebo propust), který je schopný podle návrhu odrážet (filtrovat) zvolenou vlnovou délku světla. Odražená vlnová délka  $\lambda_B$  je určena periodou střídání indexu lomu:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (2.5)$$

kde  $n_{eff}$  je index lomu vlákna, do nějž je mřížka vepsána, a  $\Lambda$  je perioda modulace (změny) indexu lomu, která je popsána funkcí:

$$n(z) = n_{co} + \delta n \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \right] \quad (2.6)$$

kde  $n_{co}$  je index lomu základního materiálu jádra vlákna,  $\delta n$  představuje rozdíl indexu lomu vepsané mřížky a základního materiálu.

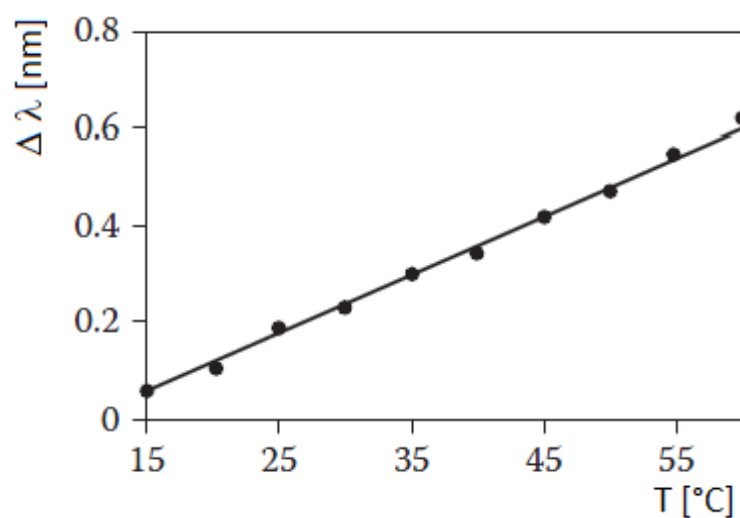
### 2.2.1 Principy snímání teploty

Pro snímání teploty pomocí FBG se využívá termooptického jevu a teplotní délkové roztažnosti materiálu vlákna. Oba jevy mění konfiguraci mřížky. Termooptický jev způsobuje změnu indexu lomu základního materiálu vlákna a modulovaného indexu lomu. Teplotní roztažnost vlákna se projevuje změnou periody mřížky. Pokud si tyto změny promítneme do vztahů (2.6) a (2.5), projeví se změna teploty vlákna posunutím vlnové délky světla odráženého mřížkou. Jedná se tedy o vlnově kódovanou odezvu.

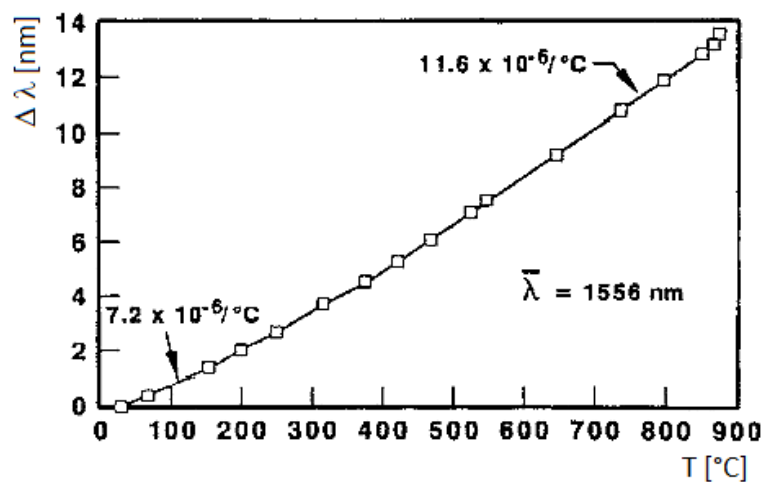
Detekce změny teploty pomocí mřížky je docílena změnou indexu lomu samotného vlákna způsobeného termooptickým efektem [2]. Teplotní roztažnost vlákna je o řád menší a nemá tedy tak velký význam. Citlivost vlákna danou termooptickým jevem lze pro teploty do 85°C vyjádřit [2, 4]:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\Delta T \lambda_B} = 6,678 * 10^{-6} \text{ } ^\circ \text{C}^{-1} \quad (2.7)$$

Typická teplotní odezva vlákna je  $0,01 \text{ nm/}^\circ\text{C}$  při  $1550 \text{ nm}$  a lze ji považovat za lineární do  $85^\circ\text{C}$ . Při teplotách nad  $85^\circ\text{C}$  se citlivost na teplotu zvyšuje a začíná být nelineární (viz. Obrázek 2.7 a Obrázek 2.8).



Obrázek 2.7: Lineární závislost FBG na teplotě [2]



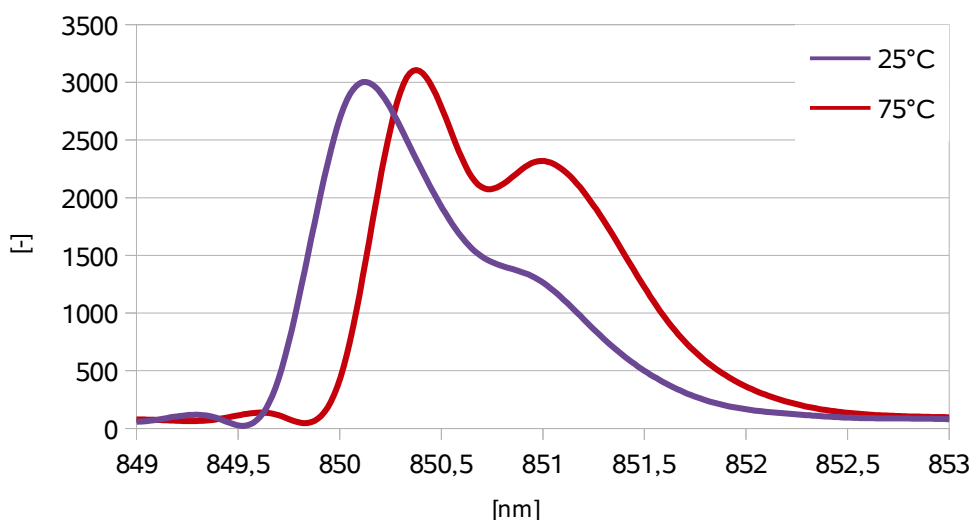
Obrázek 2.8: Nelineární závislost FBG při vysokých teplotách [4]



### 2.2.2 FBG teplotní senzory

Pro vytváření FBG senzorů se používají jednovidová vlákna, do jejichž jádra je vepsána mřížka. Zápis mřížky (periodická změna indexu lomu), se provádí ozářením jádra vlákna UV zářením, které vytvoří interferenční proužky ve vzdálenosti periody mřížky. Potřebné interferenční proužky jsou vytvořeny nejčastěji osvětlením dvěma křížícími se svazky (holografická metoda), nebo osvětlením přes difrakční masku [3, 4]. Citlivosti vlákna na UV záření (fotosenzitivita), je dosaženo dopováním jádra vhodnými příměsemi např. Ge nebo H (tzv. Hydrogen Loading) [4]. Typická délka mřížky u vláken používaných pro senzorickou činnost se pohybuje od několika milimetrů po několik centimetrů. Perioda mřížky se u běžných FBG pohybuje mezi 400 a 2000 nm [3]. Vyrábějí se i mřížky s periodou mezi 50  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$ , tyto mřížky tvoří samostatnou třídu označovanou jako LPFG (Long Period Fiber Grating).

Nejjednodušší konstrukci představují bodové senzory tvořené jednou mřížkou, schopné měřit teplotu v jednom bodě vlákna. Měření se provádí spektrometrem, kterým je zaznamenáván posuv centrální vlnové délky odražené zpět (Obrázek 2.9), nebo filtrované v průchozím směru. Díky malým rozměrům mřížky a jejímu umístění uvnitř vlákna, lze snadno vytvářet různorodé senzory zabudované do kompozitních materiálů, nebo je dodatečně montovat či lepit na sledovaný objekt. Umístěním více mřížek podél celého vlákna, lze vytvořit pole kvasi-distribuoovaných bodových senzorů a získat tak informace o teplotě nejen v čase, ale i v prostoru. Předpokladem takového uspořádání je vhodná volba  $\lambda_B$  jednotlivých mřížek tak, aby se jejich spektra nepřekrývala. Jednotlivé teploty lze pak monitorovat jako posuv vlnové délky každé odražené spektrální čáry.



Obrázek 2.9: Posuv spektrální čáry při ohřevu vlákna s FBG z 25 na 75°C

## 2.3 Mřížkové vláknové optické senzory s dlouhou periodou

Mřížky s dlouhou periodou (LPFG, někdy zkráceně LPG) tvoří poměrně novou třídu mřížek s periodou typicky od 50  $\mu\text{m}$  do 500  $\mu\text{m}$ . Dlouhá perioda mřížkování umožňuje vyvázání části světla z hlavního vidu šířícího se jádrem do diskretních plášťových vidů. Plášťové vidy jsou značně utlumeny díky špatným vlnovodným vlastnostem pláště a ohybům vlákna. V přenosovém (ne v odraženém) spektru se toto projevuje jako série rezonujících útlumových pásem, které se objevují v okolí rezonanční vlnové délky  $\lambda_{RES}$  při splnění fázových podmínek [2, 4, 5]:

$$\lambda_{res} = (n_{co,eff}^{01} - n_{cl,eff}^m) \Lambda \quad (2.8)$$

kde  $n_{co,eff}^{01}$  je index lomu základního vidu jádra,  $n_{cl,eff}^m$  je index lomu m-tého plášťového vidu a  $\Lambda$  je perioda mřížkování.

### 2.3.1 Principy snímání teploty

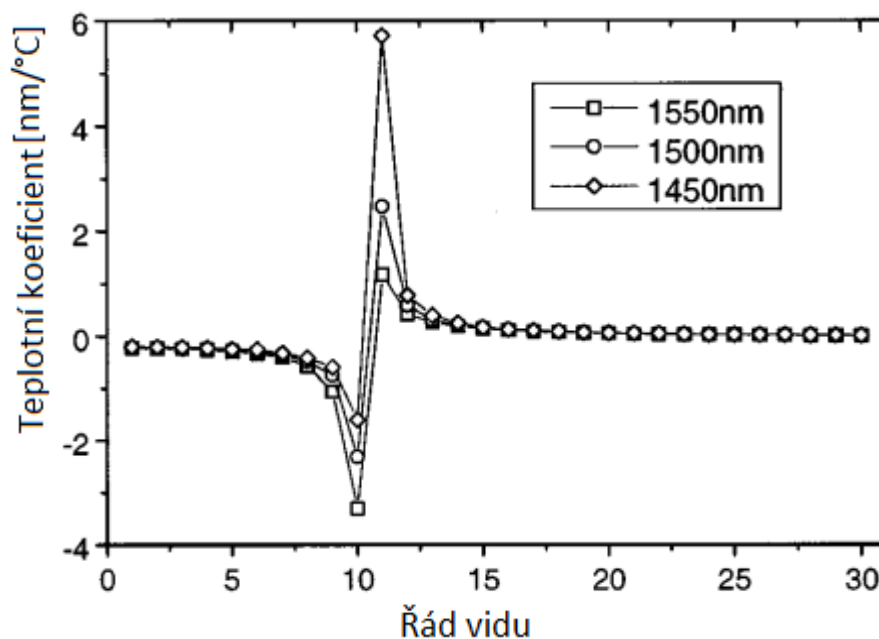
Stejně jako u mřížek s krátkou periodou i zde se změna teploty projevuje posunutím spektrální čáry. Teplotní závislost je obdobně jako v případě FBG v menší míře závislá na změně periodicity způsobené délkovou roztažností vlákna mřížky a silně závislá na teplotní změně indexu lomu. Rozdíl mezi činnostmi FBG a LPFG je dán rozložením světla ve vlákne. Protože v případě FBG je převážná část světla vázaná v jádře, projevuje se zde závislost na změně indexu lomu jádra. V případě LPFG je podstatná část výkonu v plášti, proto dochází k ovlivňování vedeného světla změnou rozdílu indexu lomu jádra a pláště.

Hlavním přínosem mřížek s dlouhou periodou z hlediska měření teploty je jejich vysoká citlivost ve srovnání s klasickými FBG. Už při použití standardního vlákna s periodou mřížky 210  $\mu\text{m}$  lze dosáhnout průměrné citlivosti 0,154  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ , což je o jeden řád více, než je běžné pro FBG (0,01  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ ) [2]. Citlivost na změnu teploty je silně závislá na typu použitého vlákna. Posun vlnové délky s rostoucí (respektive klesající) teplotou není monotónní jako v případě FBG, navíc může být i záporný (posuv směrem k UV) nebo kladný (IR) pro určité rozsahy měření. Každé útlumové pásmo se projevuje jinou odezvou na změnu teploty. Monitorováním odlišných útlumových pásem lze dosáhnout odlišných citlivostí a rozsahů měření.

### 2.3.2 LPFG senzory s vysokou teplotní citlivostí

Pomocí LPFG lze konstruovat senzory s velmi vysokou citlivostí na změnu teploty. Jednou z možností jak dosáhnout vysoké citlivosti, je znovu opláštění jádra vlákna použitím speciálních materiálů (většinou polymerů), které mají vysoký termooptický koeficient. Například u vlákna, jehož plášť byl potažen speciálním polymerem, bylo dosaženo teplotní odezvy až 80nm/100°C (resp. 0,8nm/°C) [2].

Vysoké citlivosti lze dosáhnout i bez použití speciálních materiálů pláště vlákna. Jelikož citlivost na teplotu je silně závislá na řádu vedeného rezonančního plášťového vidu, lze docílit větší citlivosti jeho správnou volbou. Měřením provedeným na mřížce o periodě 240 um zapsané do konvenčního (B-Ge dopovaného) vlákna bylo dosaženo citlivosti 2,75nm/°C v rozsahu 10°C. Dále bylo zjištěno, že největší citlivost je v oblasti desátého a jedenáctého vidu, a že v této oblasti dochází i ke změně znaménka teplotního koeficientu (Obrázek 2.10) [6].



Obrázek 2.10: Kalkulace závislosti teplotního koeficientu na řádu sledovaném plášťovém vidu [6]

Zajímavých výsledků, rovněž s použitím standardního B-Ge vlákna, lze dosáhnout s mřížkou o periodě 400 um ponořenou do imerzní kapaliny s velkým termooptickým koeficientem. Zahříváním dochází ke změně indexu lomu kapaliny a tím i k ovlivňování plášťových vidů a změně přenosového spektra LPFG. Tímto způsobem bylo v úzkém rozsahu (1,1°C) dosaženo extrémně vysoké citlivosti 19,2nm/°C. I v tomto případě byla zaznamenána různá citlivost mřížky na změnu teploty napříč útlumovým spektrem [7].

## 2.4 Měření teploty s využitím zpětného rozptylu

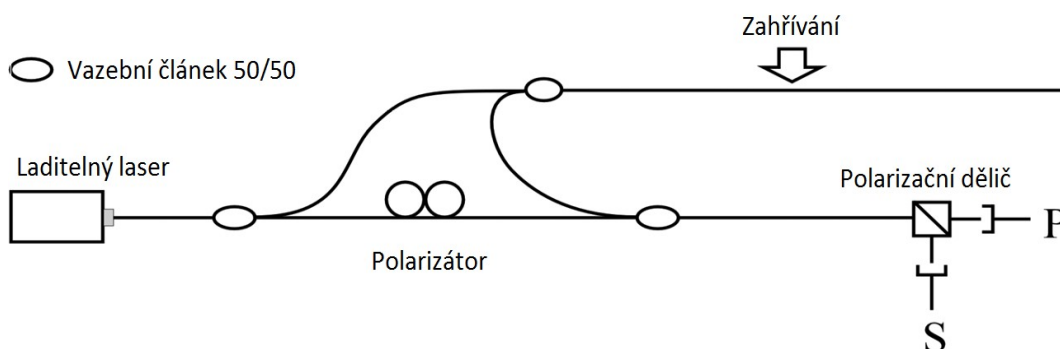
Metody měření teploty za pomoci zpětného rozptylu těží z vývoje optických reflektometrů (OTDR), používaných v telekomunikacích pro měření útlumu a kontinuity trasy vlákna. K měření zpětně rozptýleného světla využívají stejných principů jako OTDR a spolu s ním sdílí společnou vlastnost a to schopnost zaznamenávat měřenou veličinu (teplotu) v průběhu celé délky vlákna. To umožňuje distribuované měření teploty na délkách vlákna v řádech od stovek metrů až do několika kilometrů při rozlišení v jednotkách metrů. Takovéto systémy měření teploty se běžně označují jako DTS (Distributed Temperature Sensing).

### 2.4.1 Metody založené na Rayleigho rozptylu

Rayleigho rozptyl je způsoben částicemi menšími než vlnová délka světla. Takovéto nehomogenity jsou způsobeny fluktuací indexu lomu jádra vlákna. Vznikají během výroby při procesu tuhnutí skla a nelze je ovlivnit. Rayleigho rozptyl je lineární a nedochází tedy ke změně vlnové délky.

Jedna z prvních konstrukcí [3] využívající k měření Rayleigho rozptylu byla založena na speciálním dutém vlákně, jehož střed byl naplněn tekutinou s nízkou absorpcí, která sloužila jako světlovodné jádro. Ztráty způsobené rozptylem kapaliny závisí na změně její hustoty v závislosti na teplotě. Změny teploty vlákna v konkrétních úsecích pak lze monitorovat obvyčejným OTDR jako změny útlumu trasy. Tento princip se příliš nevyužívá, jelikož kapalinou plněná vlákna jsou nepraktická. Namísto toho se k dosažení teplotní závislosti vlákna používá dopování materiálu jádra použitím iontů vzácných zemin jako  $\text{Nd}^{3+}$  a  $\text{Ho}^{3+}$  [3]. Takováto vlákna vykazují silné teplotně závislé absorpční maxima ve viditelné a blízké infračervené oblasti. Nevýhodou těchto senzorických vláken je velký nárůst útlumu s teplotou, což omezuje délku měřeného úseku.

Existuje i způsob jak měřit teplotu bez použití dopovaných vláken s využitím Rayleigho rozptylu. Měřicí sestava na obrázku (Obrázek 2.11)[10] znázorňuje zapojení využívající vlnovou délkou rozmlítaný interferometr (SWI) k měření Rayleigho zpětného rozptylu. SWI je využíván k měření amplitudy a fáze zpětně rozptýleného signálu Rayleigho rozptylu. Světlo z laditelného laserového zdroje je rovnoměrně rozděleno do ramen interferometru. Zpětně rozptýlené světlo se pak rekombinuje s referenčním polarizovaným světlem. Na detektorech se zaznamenává interference měřeného pole s jednotlivými polarizačními složkami.

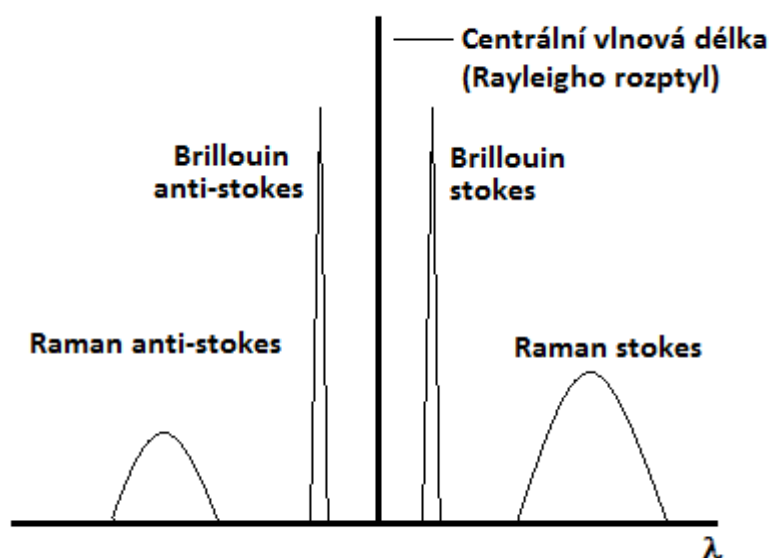


Obrázek 2.11: Sestava pro měření teploty pomocí stavu polarizace Rayleighova rozptylu [12]

Naměřené profily rozptylu (tzv. Scatter Profiles) jsou pak za pomoci Fourierovy transformace převedeny do frekvenční oblasti. Změna teploty se projevuje jako posun spektra odraženého signálu. Velikost posunu spektra se určuje pomocí křížové korelace s referenčním spektrem (měřeném na nominální teplotě). V experimentálním měření bylo dosaženo rozlišení 0,3 °C při prostorovém rozlišení polohy 5 mm.

#### 2.4.2 Metody založené na Ramanově a Brillouinově rozptylu

Ramanův a Brillouinův rozptyl jsou představitelé neelastických rozptylů, při nichž dochází k posunutí vlnové délky zpětně rozptýleného signálu. Spektrální rozložení typického zpětného rozptylu je zobrazeno na obrázku (Obrázek 2.12). Výkon Ramanova rozptylu je asi o 20 až 30 dB menší než Rayleighova rozptyl a je na rozdíl od Brillouinova rozptylu více vzdálen od centrální vlnové délky.



Obrázek 2.12: Spektrum zpětného rozptylu

Měřicí systémy využívající Brillouinův a Ramanův rozptyl tvoří dvě skupiny. První z nich využívají pro svou činnost jednořadová vlákna a druhé mnohářadová vlákna. DTS založená na Brillouin rozptylu dosahují teplotního rozlišení  $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$  při prostorovém rozlišení  $0,5\text{ m}$ . V případě Ramanova DTS je teplotní rozlišení  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$  při prostorovém rozlišení  $1\text{ m}$  [13]. K měření teploty se u obou systémů využívá toho, že Stokes složka zpětného rozptylu je teplotně nezávislá a slouží jako reference, kdežto Anti-Stokes složka je teplotně závislá. U Brillouinova rozptylu dochází k posunu vlnové délky Anti-Stokes a u Ramanova rozptylu ke změně jeho amplitudy.

### 3 Modely senzorů teploty s různě zakřivenými optickými vlákny

Se změnou teploty optického vlákna se začínají projevovat jevy, které ovlivňují jeho přenosové parametry. Základními jevy, které můžeme pozorovat jsou termooptický efekt a délková teplotní roztažnost vlákna. Vliv délkové teplotní roztažnosti vlákna je malý a má obecně malý vliv na přenosové parametry vlákna (jak je patrné z kapitoly 2). Ve srovnání s tím změna indexu lomu vlákna, způsobená termooptickým jevem, významně mění vlnovodné vlastnosti vlákna. Pro umocnění teplotně závislých jevů je možné vlákna zakřivovat v různých poloměrech.

#### 3.1 Vliv změny indexu lomu vlákna

Vliv změny indexu lomu lze jednoduše demonstrovat paprskovou optikou, jestliže je odraz a lom svazku na dvou rozhraních charakterizován Snellovým zákonem lomu:

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (3.0)$$

kde  $n_1$  a  $n_2$  jsou indexu lomu prostředí, v našem případě index lomu jádra a pláště. Potom  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ , odpovídají úhlům dopadu a lomu. V případě úplného odrazu, který nastává ve světlovodu, lze vztah (3.0) zapsat ve formě:

$$\sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.1)$$

kde  $\phi_c$  představuje kritický úhel. Pokud si vyjádříme závislost indexu lomu jádra a pláště na teplotě  $T$  jako  $n_1(T)$  respektive  $n_2(T)$ , můžeme pak přepsat vztah (3.0) v závislosti na teplotě takto:

$$\sin \phi_c(T) = \frac{n_2(T)}{n_1(T)} \quad (3.2)$$

Ze vztahu vyplývá, že se změnou teploty (resp. indexu lomu) dojde i ke změně kritického úhlu, pod kterým je ještě světlo udržováno v jádře. To se ve výsledku projeví změnou útlumu vlákna.

Vlnovodné vlastnosti vlákna z pohledu vnějšího prostředí (vzduch), lze charakterizovat numerickou aperturou  $NA$ :

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.3)$$

kde  $n_1$  je index lomu jádra a  $n_2$  index lomu pláště. Opět lze vyjádřit numerickou aperturu v závislosti na teplotě:

$$NA(T) = \sqrt{n_1^2(T) - n_2^2(T)} \quad (3.4)$$

Je patrné, že změnou teploty dojde ke změně velikosti přijímaného světelného kuželu. Tuto změnu je pak možné na výstupu vlákna sledovat jako změnu kuželu světelného svazku vyzařovaného z vlákna.

Pokud bychom znali přesně hodnotu termooptického koeficientu materiálu jádra a pláště vlákna, bylo by možné teoreticky určit konkrétní změnu parametrů vlákna v závislosti na teplotě. Většina výrobců (obzvláště telekomunikačních vláken) ale hodnotu termooptického koeficientu neuvádí. Přesto lze na základě informací o chování indexu lomu [13] říct, že hodnota termooptického koeficientu se řádově pohybuje v hodnotách  $10^{-4}$  až  $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Pokud se omezíme pouze na to, že hodnota termooptického koeficientu je kladná a zároveň si uvědomíme, že platí  $n_2 < n_1$ , lze funkci  $NA(T)$  ze vztahu (3.4) považovat za rostoucí s teplotou. Při zvýšení teploty tedy dojde ke zvětšení  $NA$ .

### 3.2 Vliv zakřivení vlákna

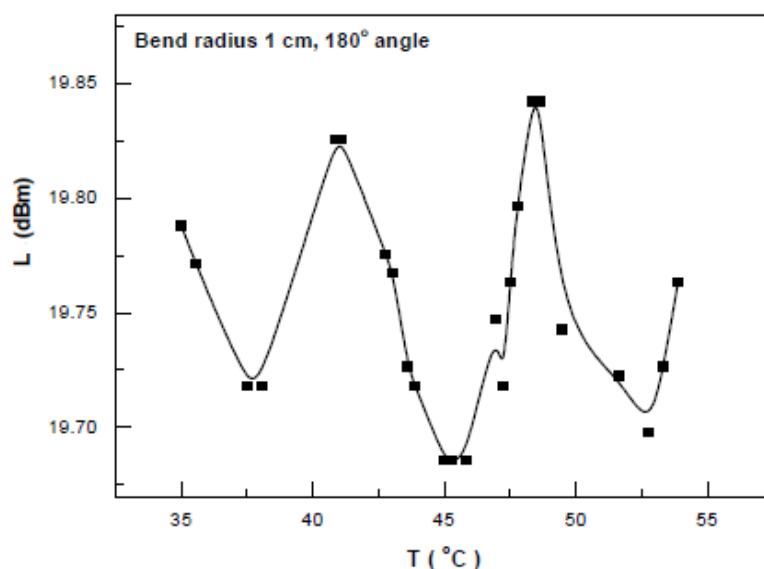
Je známo, že ohyby vlákna narušují tvar vlnovodu a způsobují vyvazování světla vedeného jádrem do pláště. V případě jednovidových vláken dochází k vyvázání vnější části evanescentní vlny do pláště. U mnohavidových vláken dochází k nesplnění podmínek totálního odrazu u některých z vedených vidů a následně k jejich průniku do pláště. Společným rysem je, že u obou typů vláken dochází při ohybu k průniku světla do pláště.

Nejjednodušší teorie, popisující chování při vyvázání světla do pláště, vychází z modelu vlákna do nekonečna obklopeného pláštěm, přičemž nedochází k opětovnému navázání světla do vlákna. Následné ztráty jsou pak považovány za trvale rostoucí spolu se zvětšujícím se zakřivením vlákna a rostoucí vlnovou délkou světla. Skutečné vlákno je ovšem tvořeno konečným pláštěm, který je navíc potažen sekundární ochranou a případnými dalšími ochrannými vrstvami. Na základě těchto faktů bylo u jednovidových vláken předpověděno a prakticky ověřeno, že skutečné ztráty v zakřiveném vláknu nemají monotónní průběh, ale že oscilují v závislosti na zakřivení vlákna [10,11]. Tento jev je vysvětlován tím, že ohybem dojde k vyvázání části energie do pláště, následkem čehož na rozhraní jádro, plášť a sekundární

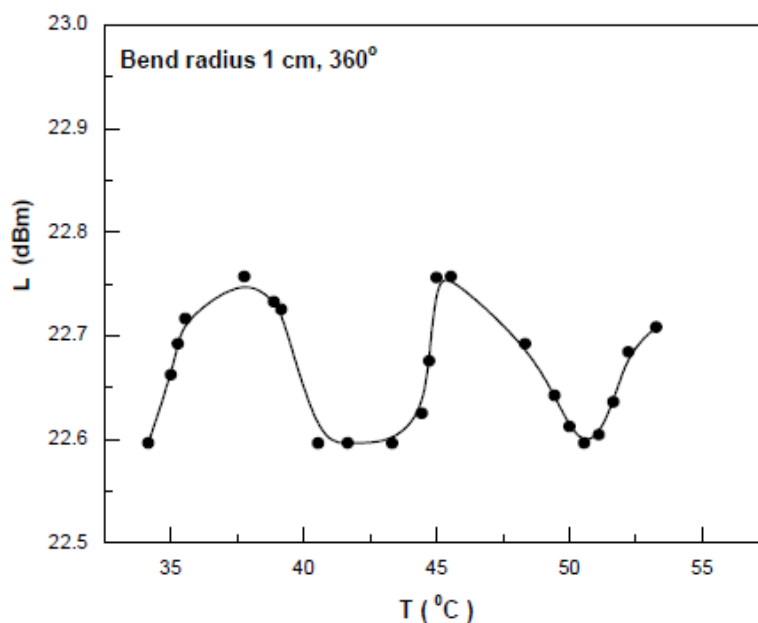


ochrana dochází ke vzniku tunelujících nebo vytékajících vidů (také označovaných jako „Whispering Gallery modes“). Tunelující či vytékající vidy vznikají při každém ohybu, šíří se mezi pláštěm a sekundární ochranou a interferují s hlavním vedeným videm. Tyto interference vytváří zmiňovaná oscilující útlumová pásma.

Na základě výzkumu [12], v němž byl zkoumán vliv teploty na různě zakřivená vlákna, bylo zjištěno, že poloha útlumových pásem se s teplotou mění (Obrázek 3.1, Obrázek 3.2). Dále bylo zjištěno, že hustota fluktuací útlumu se mění se zakřivením vlákna. Větším zakřivením dojde ke zvětšení mezer mezi oscilacemi útlumu.



Obrázek 3.1: Teplotně závislý útlum vlákna při ohybu o 180° na poloměru 1cm[10]



Obrázek 3.2: Teplotně závislý útlum vlákna při ohybu o 360° na poloměru 1cm[10]

### 3.3 Měřené modely zakřivení

Na základě informací dostupných o metodách měření teploty pomocí optických vláken uvedených v předchozích kapitolách, byly zvoleny následující modely zakřivení:

- Průměr zakřivení vlákna: 15 mm, 20 mm, 25mm, 35 mm.
- Úhel zakřivení (počet závitů o 360°) 1 až 4 závitů.

K zakřívování byla zvolena standardní telekomunikační vlákna:

- jednovidové ITU-T G.652,
- mnohavidové ITU-T G.651 (50/125  $\mu\text{m}$ ).

Pro jednovidová vlákna byly použity vlnové délky 1550 nm a 1310 nm, pro mnohavidová vlákna 974 nm.

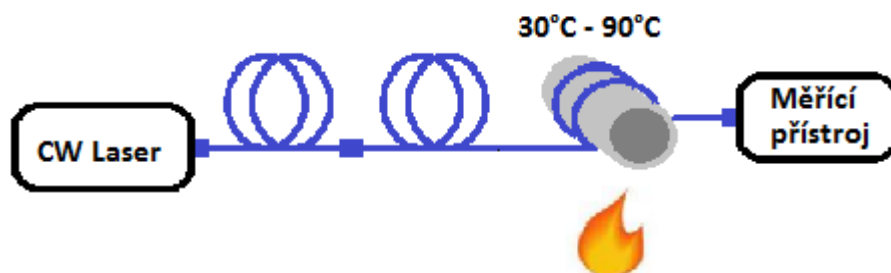
Vlákna byla postupně ohýbána a zahřívána v rozmezí teplot 30°C až 90°C ve vodní lázni. Rozsah teplot byl zvolen s ohledem na parametry plastových ochran vlákna.

## 4 Metodika měření

Propustnost zakřivených vláken jsem měřil ze dvou pohledů. Z hlediska výkonových ztrát pomocí měřiče výkonu a z pohledu prostorového rozložení výkonu ve vlákne s využitím měřiče profilu svazku (Beam profiler).

Jako zdroj světla jsem pro měření jednovidových vláken na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm použil NOYES OLS2 obsahující polovodičový laser. Zdroj pracoval v kontinuálním režimu (CW). Pro měření mnohavidových vláken jsem použil zdroj SAFIBRA OFLS-B obsahující SLED pracující na vlnové délce 974 nm, zdroj pracoval v kontinuálním režimu (CW).

Vlákna byla zahřívána ve vodní lázni s elektrickým ohřevem (vana MEMMERT One 7). Vana disponuje dvěma čidly teploty PT100 s kontrolou a indikací teploty. Nastavená teplota je automaticky nastavena a udržována PID regulací.



Obrázek 4.1: Schématické zapojení měřicí sestavy pro měření výkonu a profilu svazku

### 4.1 Ztráty ve vlákne

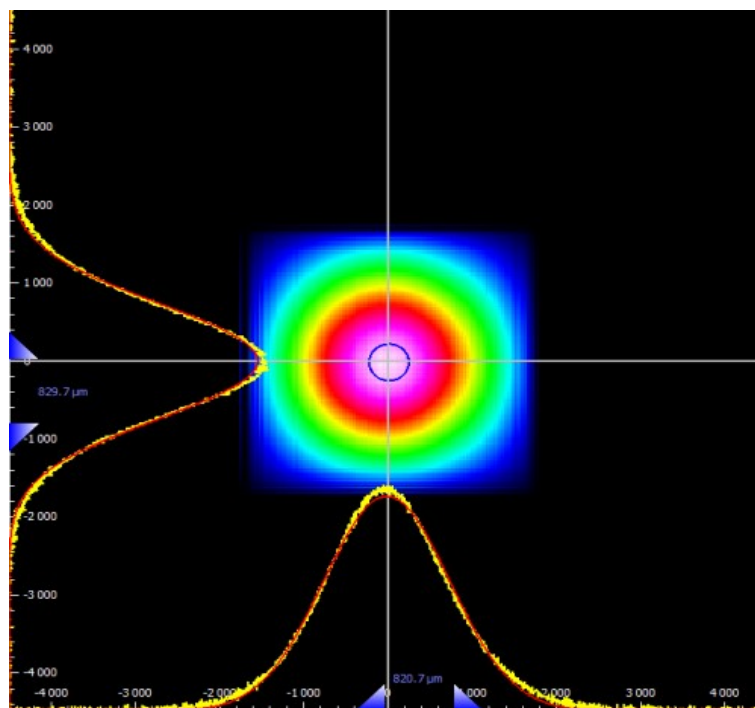
Výkonové ztráty ve vlákne byly na vlnové délce 1310 nm a 1550 nm měřeny měřičem výkonu NOYES OPM4. Pro vlnovou délku 974 nm byl použit měřič výkonu EXFO AXS - 200/350.

Schématické zobrazení zapojení měřicí sestavy je na obrázku (Obrázek 4.1). Měřeno bylo vždy druhé vlákno, první vlákno sloužilo pouze k navázání světla. Měřené vlákno jsem namotal na trubku v požadovaném počtu závitů. Vlákno jsem pak proti samovolnému odvíjení zajistil elastickou izolepou používanou k izolaci elektrických vodičů. Takto namotané vlákno jsem vložil do vodní lázně a zahříval od 30 °C do 90 °C. Poté jsem celý postup opakoval pro ostatní zakřivení a vlákna.

## 4.2 Profil svazku

Profil svazku byl měřen na všech vlnových délkách měřičem profilu svazku THORLABS BP109-IR vybaveným motorizovaným posuvným stanovištěm pro měřící hlavu (příslušenství BP1M2). Přístroj pracuje na principu skenujících štěrbin umístěných na rotujícím bubnu. BP109 obsahuje dvě štěrbinové posunuté vůči sobě o  $90^\circ$ , takže měří profil svazku ve dvou osách (x a y). Na základě údajů o profilech v osách x a y je pak schopen rekonstruovat aproximovaný 2D a 3D graf intenzity svazku (viz. Obrázek 4.2).

Zapojení měřící sestavy bylo totožné s měřením ztrát ve vlákne (Obrázek 4.1). Vláknem jsem umístil v držáku v těsné blízkosti (méně než milimetr) před měřící hlavou a za pomoci aplikace vycentroval tak, aby svazek svítil na střed snímače. Poté jsem nastavil referenční úroveň (kalibrace) a odsunul měřící hlavu od čela vlákna a opět vycentroval svazek na střed snímače. Výsledek po vycentrování je zobrazen na obrázku (Obrázek 4.2).



Obrázek 4.2: 2D graf intenzity svazku jednomodového vlákna po finálním vycentrování (vzdálenost od čela vlákna 15mm)

Vzdálenost mezi čelem vlákna a měřící hlavou jsem zvolil 15 mm pro jednomodové vlákno a 5 mm pro mnohavidové vlákno. Vybrané vzdálenosti jsou kompromisem mezi velikostí průměru svazku a zachyceným výkonem. Pokud je totiž měřící hlava příliš blízko je sice světelný výkon dopadající na snímač velký, ale průměr svazku je příliš malý. Výkon je pak soustředěn na malé ploše CCD snímače, což značně snižuje rozlišení přístroje. Pokud je naopak vzdálenost měřící hlavy od čela vlákna příliš velká, je svazek široký, ale protože dopadá na

větší plochu, je zapotřebí větší hustoty výkonu laserového zdroje, aby výkon dopadající na snímač byl dostatečně velký. Malý výkon dopadající na snímač způsobuje rapidní nárůst šumu, který snižuje rozlišovací možnosti měření. Pro zlepšení odstupu signálu od šumu jsem zvolil desetinásobné průměrování výsledků. Vyšší nastavení nepřinášelo příliš velké zlepšení a znatelně prodlužovalo dobu měření.

Měření zakřivených optických vláken jsem prováděl stejným způsobem, jaký byl popsán u měření ztrát ve vláknech. Naměřená data o profilech jsem exportoval do souboru k pozdějšímu zpracování. Veškerá exportovaná data jsou přiložena v elektronické příloze. Mimo samotných surových dat o průběhu profilu, přístroj měřil přímo i šířku svazku FWHM.

Ovládací aplikace, která byla k dispozici, exportovala naměřená data profilu v surové formě jako dvojice hodnot [číslo pixelu; intenzita] pro každý pixel. Pro zjištění skutečné pozice měřeného bodu bylo zapotřebí přepočítat velikost pixelu na vzdálenost. Přepočet z pixelu na mikrometry byl na základě velikosti pixelu 1,20  $\mu\text{m}$  (udávaný ovládací aplikací) proveden podle následujícího vztahu:

$$p_{um} = p_{pix} * 1,2 \quad (4.0)$$

kde  $p_{um}$  je výsledná pozice v  $\mu\text{m}$ ,  $p_{pix}$  je pořadové číslo pixelu a 1,2 velikost pixelu.

## 5 Výsledky měření propustnosti vlákna

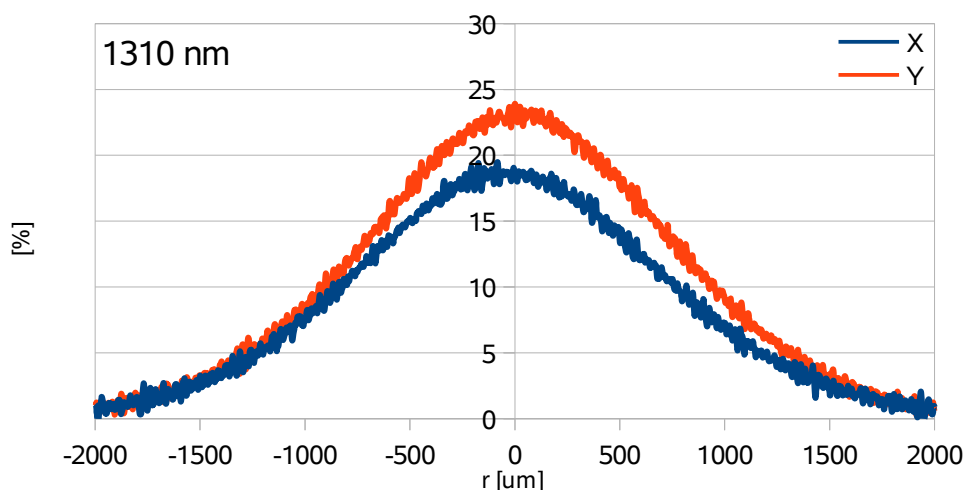
### 5.1 Referenční měření při konstantní teplotě

#### 5.1.1 Profil svazku

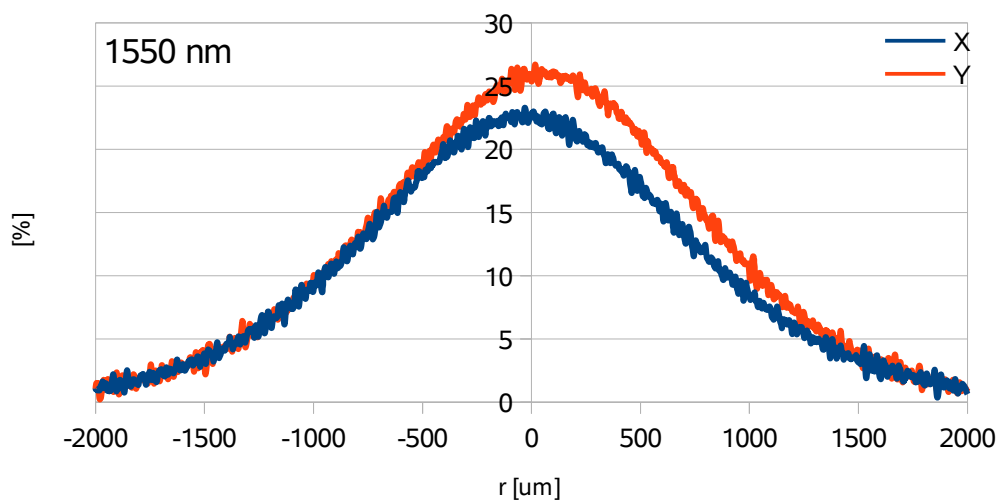
Na prvních dvou grafech jsou zobrazeny profily svazku na výstupu z jednovidového vlákna bez vnějších vlivů. Na vlnové délce 1310 nm (graf Obrázek 5.1) je vidět, že svazek není dokonale souměrný. Amplituda profilu v ose x je o 5% menší než v ose y, také průměr svazku není stejný. Podobná situace je i na vlnové délce 1550 nm (graf Obrázek 5.2), opět je zde asymetrie mezi osami x a y.

Na grafu (Obrázek 5.3) je zobrazen profil mnohavidového vlákna. Na první pohled je patrný nepravidelný tvar svazku obsahující několik oblastí s maximální intenzitou. Tato maxima představují shluky vedených vidů, tak jak postupně dopadaly na snímač během jednoho snímku. Byla v čase nestálá a docházelo k jejich mírnému chvění. Zajímavou vlastností profilu mnohavidového vlákna byla jeho extrémní citlivost na jakékoliv vibrace a pohyb.

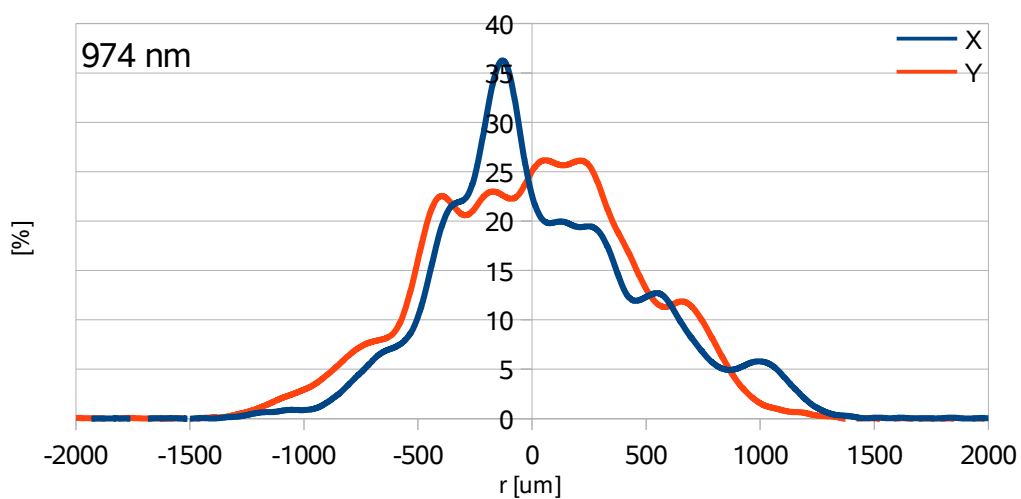
Detailnější grafy zobrazující prostorové rozložení výkonu použitých laseru jsou přiloženy v příloze Příloha A (1310 nm a 1550 nm) a Příloha B (974 nm).



Obrázek 5.1: Profil svazku bez zakřivení vlákna (1310 nm, 25°C)



Obrázek 5.2: Profil svazku bez zakřivení vlákna (1550 nm, 25°C)



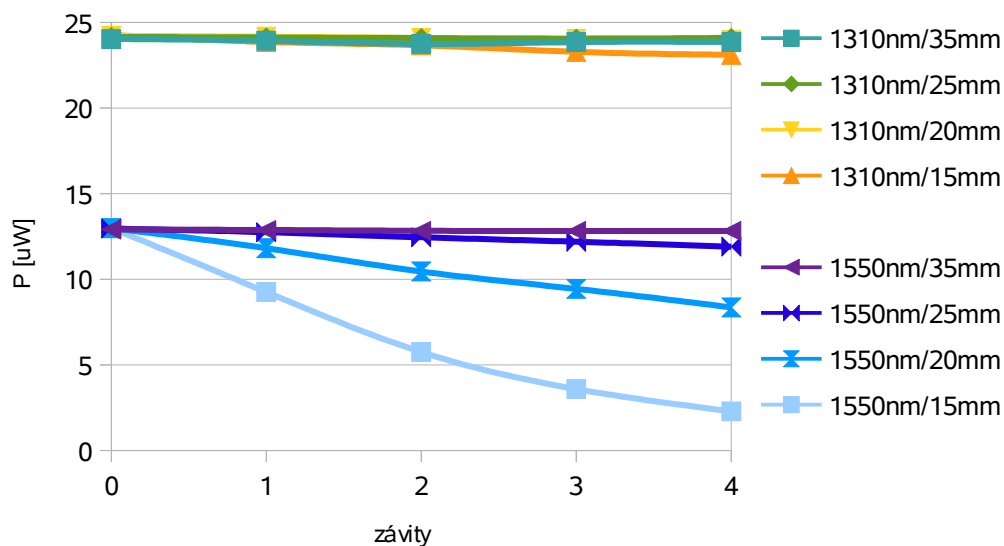
Obrázek 5.3: Profil svazku bez zakřivení vlákna (974 nm, 25°C)

### 5.1.2 Výkon ve vláknu

Na obrázku (Obrázek 5.4) je zobrazen graf ukazující naměřený průběh výkonu v závislosti na zakřivení pro jednovidová vlákna. Dle očekávání došlo k největším ztrátám výkonu na vlnové délce 1550 nm při zakřivení na průměru 15 mm. Velké ztráty byly zaznamenány také na 20 mm, na 25 mm došlo jen k mírnému poklesu výkonu. Na 35 mm nebyla zaznamenána žádná ztráta výkonu.

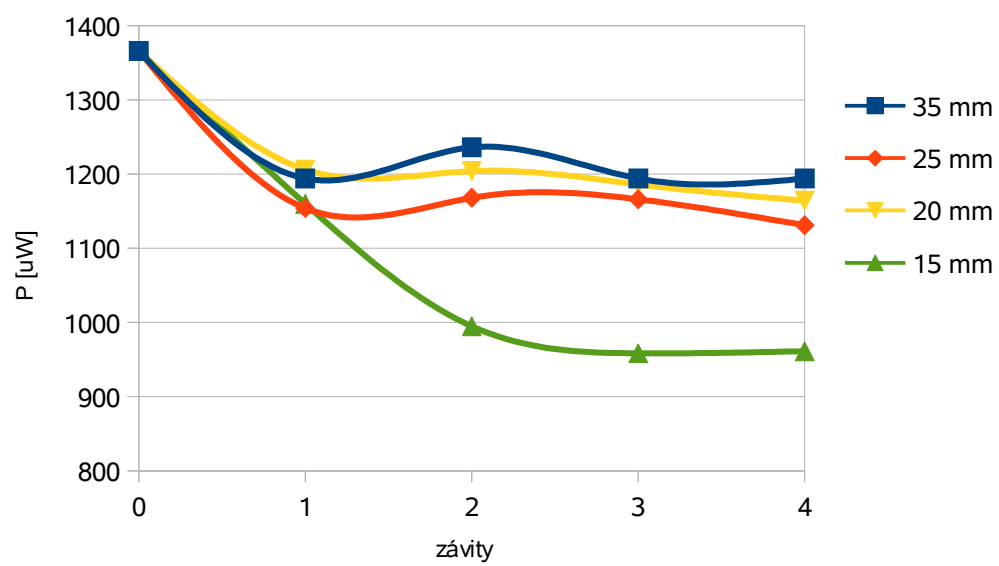
Na vlnové délce 1310 nm se projevuje menší citlivost kratších vlnových délek na ohyby. Ve srovnání s 1550 nm jsou ztráty velmi malé, přesto došlo při čtyřech závitech na zakřivení 15 mm ke znatelnému poklesu výkonu o 1 uW, což je téměř 5%. U mnohavidového vlákna (Obrázek 5.5) došlo k výraznému poklesu výkonu po prvním závitě (na druhém závitě u 15 mm). Pokles je způsobený vyvázáním slabě vedených vidů (vidy navázané pod velkým úhlem) ven z vlákna. Další zvyšování počtu závitů zakřiveného vlákna nevedlo k výraznějšímu poklesu výkonu. Také lze pozorovat jemné zvlnění způsobené opětovným navázáním světla do vlákna.

Z naměřených výsledků vyplývá, že ohyby v následujících měřeních mají největší vliv při zakřivení 15 mm a 25 mm na vlnové délce 1550 nm a 1310 nm.



Obrázek 5.4: Závislost optického výkonu na zakřivení vlákna (počtu závitů), srovnání vlnových délek 1550 nm a 1310 nm



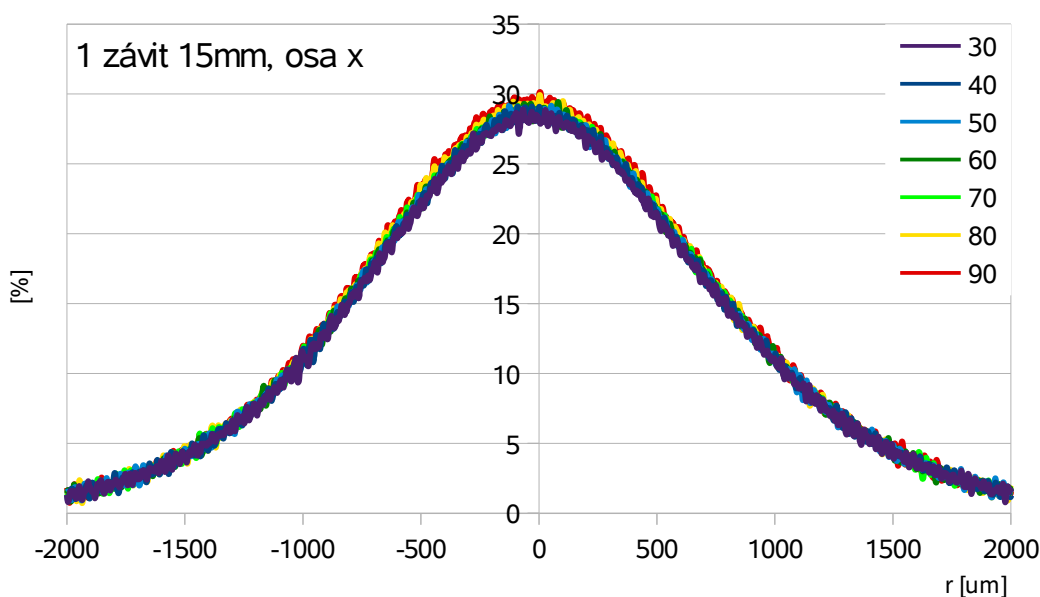


Obrázek 5.5: Závislost optického výkonu na zakřivení mnohavidového vlákna

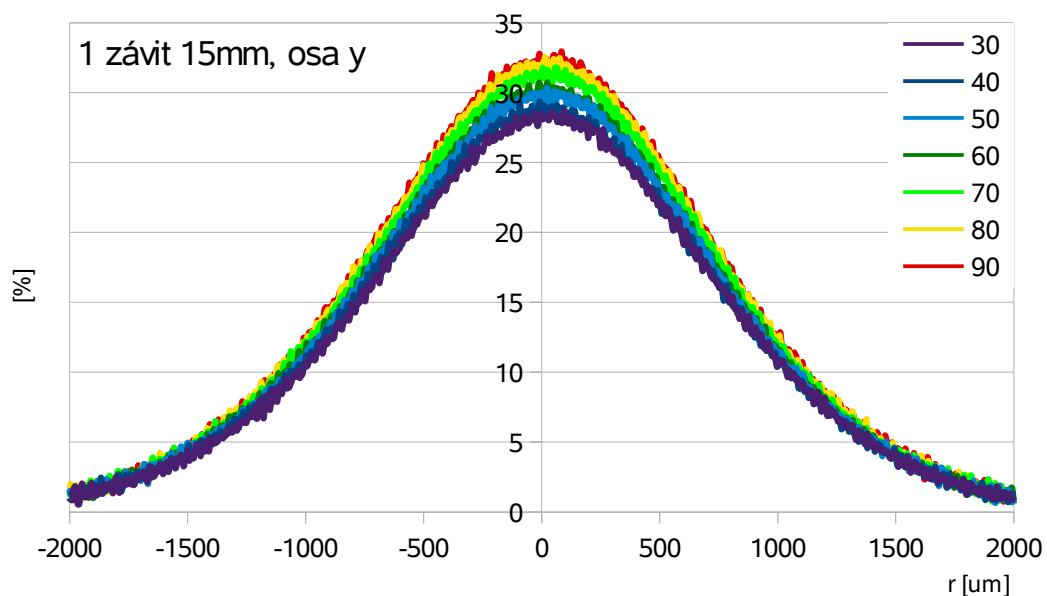
## 5.2 Profil svazku 1550 nm

Na následujících dvou grafech jsou zobrazeny naměřené profily svazku (v osách x a y) při zahřívání z 30°C na 90°C. Jedná se o měření na jednovidovém vlákne při použití vlnové délky 1550 nm. Hodnoty na horizontální ose představují poloměr svazku, resp. vzdálenost od středu snímače v mikrometrech. Vertikální osa reprezentuje relativní hodnotu amplitudy v procentech, která je vztažena k výkonu při nulové vzdálenosti od čela vlákna (ve skutečnosti se jedná o saturaci AD převodníku).

Na grafu zobrazující profil v ose x (Obrázek 5.6) lze pozorovat, že amplituda naměřeného profilu se s teplotou mění pouze nepatrně. Pokud se podíváme na výsledky profilu v ose y (Obrázek 5.7), které byly naměřeny ve stejný okamžik, je situace poněkud jiná. Amplituda profilu s teplotou roste a dochází k zvětšování průměru svazku. Rostoucí průměr svazku značí, že došlo ke zvětšení numerické apertury, což souhlasí s teorií uvedenou v předchozí kapitole (3.1). Rozdílné průběhy profilů v obou v osách x a y si vysvětlují vlivem zakřivení vlákna.

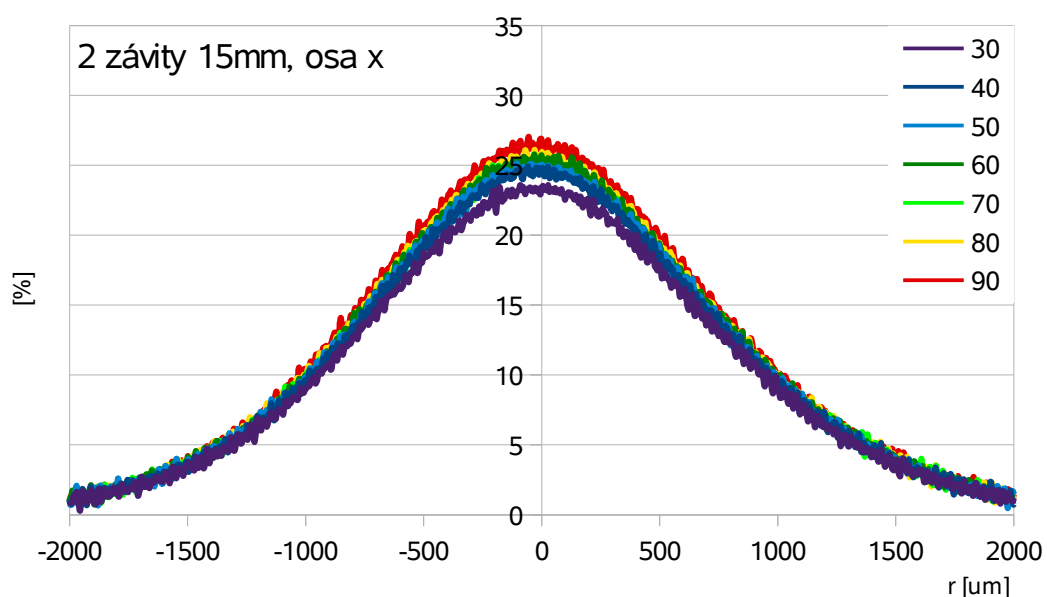


Obrázek 5.6: Profily svazku v ose x jednovidového vlákna (1550 nm) při zahřívání, 1 závit na 15mm

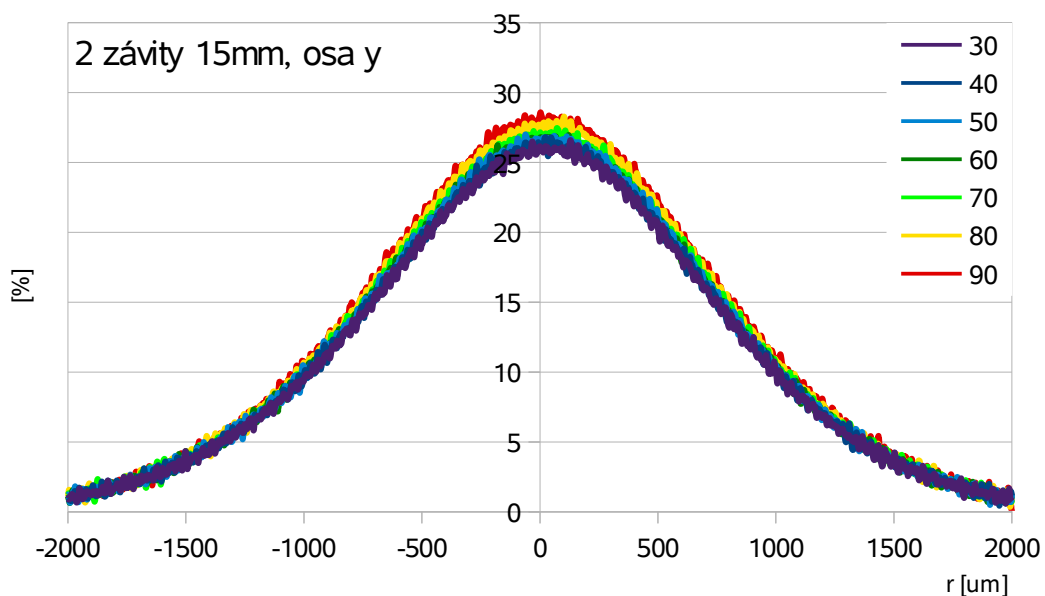


Obrázek 5.7: Profily svazku v ose y jednojádrového vlákna (1550 nm) při zahřívání, 1 závit na 15mm

Na následujících dvou grafech (Obrázek 5.8, Obrázek 5.9) jsou zobrazeny výsledky měření při dvou závitech a zakřivení 15 mm. Ve srovnání s předchozími výsledky, lze zde pozorovat, že teplotní závislost se tentokrát projevila více v profilu v ose x (namísto osy y). Navýšení amplitudy bylo ovšem menší než v předchozím případě (Obrázek 5.7) a zároveň v druhé ose došlo k silnějšímu nárůstu, ve srovnání s téměř žádným nárůstem v grafu (Obrázek 5.6). Toto chování lze vysvětlit tím, že svazek byl opět deformován, ale v jiném směru, protože došlo k přetočení vlákna.

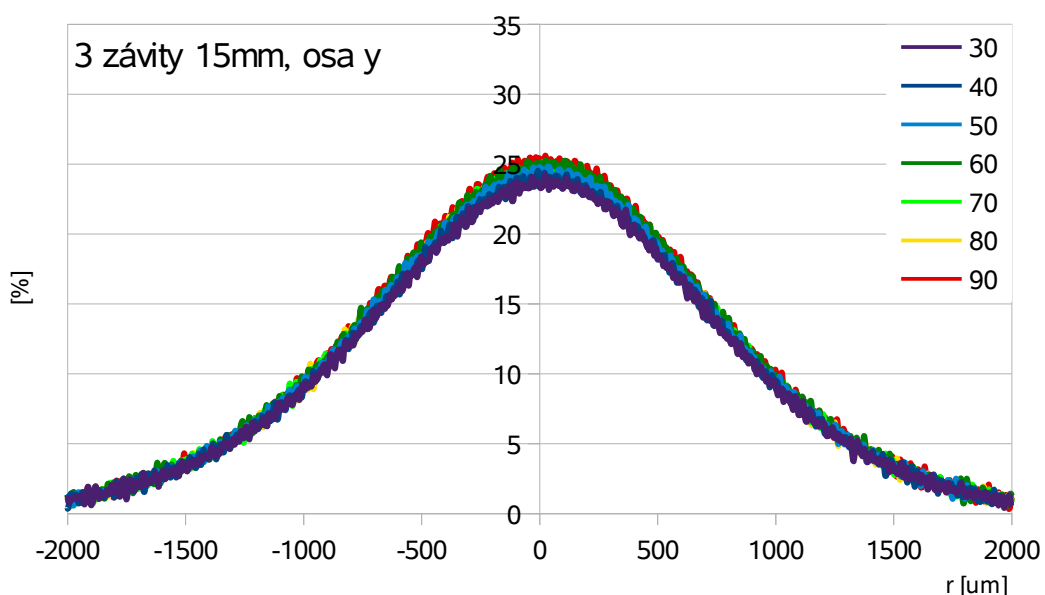


Obrázek 5.8: Profily svazku v ose x jednojádrového vlákna (1550 nm) při zahřívání, 2 závity na 15mm

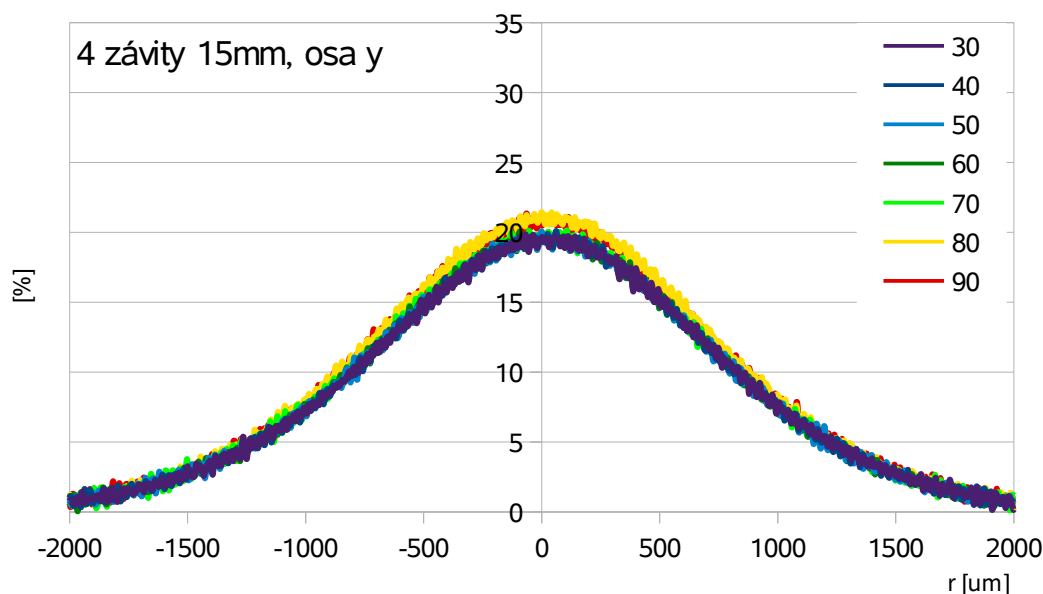


Obrázek 5.9: Profily svazku v ose y jednovídnového vlákna (1550 nm) při zahřívání, 2 závitů na 15mm

Pro úplnost, jsou na grafech (Obrázek 5.10, Obrázek 5.11) zobrazeny zbývající profily pro měření na průměru zakřivení 15 mm. Byly vybrány výsledky u nichž je vliv teploty nejpatrnější. Jak je vidět, teplotní závislost se projevila méně než v předchozích případech. To je zřejmě způsobeno přílišným zakřivením vlákna. Dále stojí za povšimnutí postupný pokles amplitudy profilu se zvětšujícími se počtem závitů zakřiveného vlákna.

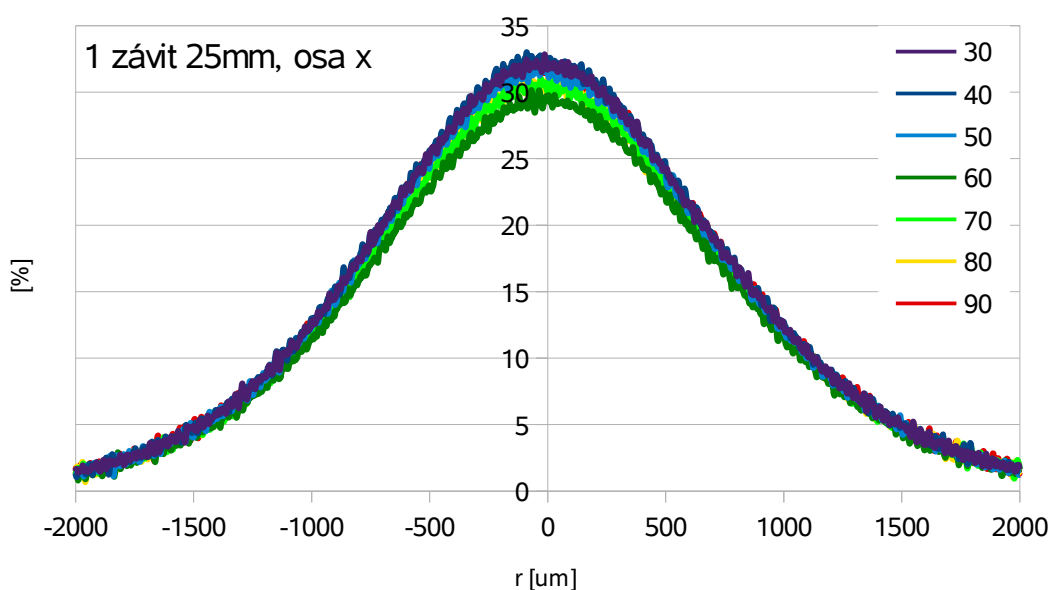


Obrázek 5.10: Profily svazku v ose y jednovídnového vlákna (1550 nm) při zahřívání, 3 závitů na 15mm



Obrázek 5.11: Profily svazku v ose y jednovídnového vlákna (1550 nm) při zahřívání, 4 závitů na 15mm

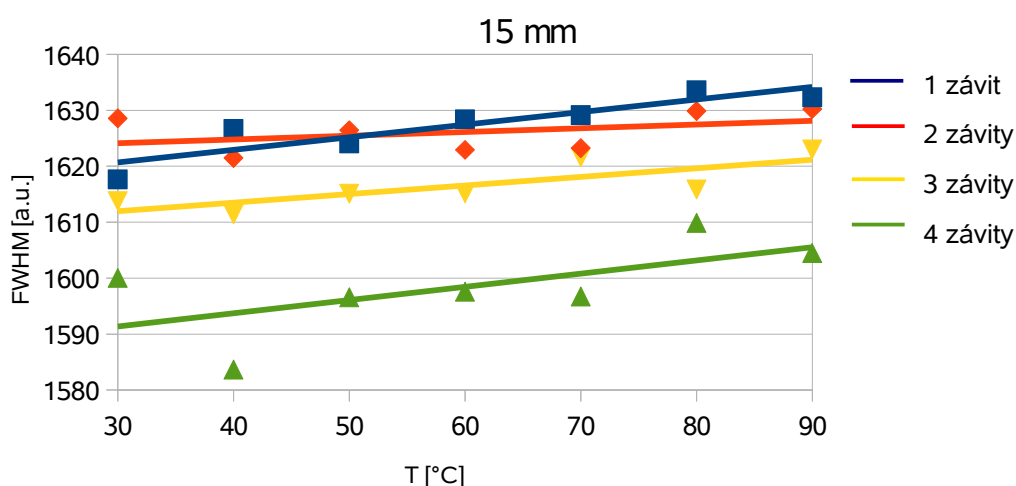
Profily měřené na ostatních průměrech zakřivení a osách jsou přiloženy v elektronické příloze. Průběhy profilu jsou podobné, obzvláště při měření na zakřivení 20 mm. Změny průměru svazku a velikosti amplitudy se neprojevují ve stejných intenzitách a při stejných počtech závitů. Opět zde došlo ke střídání mezi osami x a y. Při zakřivení vlákna 25 mm a 35 mm docházelo spíše k nahodilým změnám amplitudy, místy došlo se zvýšením teploty k poklesu amplitudy (viz. graf Obrázek 5.12). Toto chování by se dalo vysvětlit buďto rezonancí útlumového pásma, nebo nestabilitou výkonu použitého laseru.



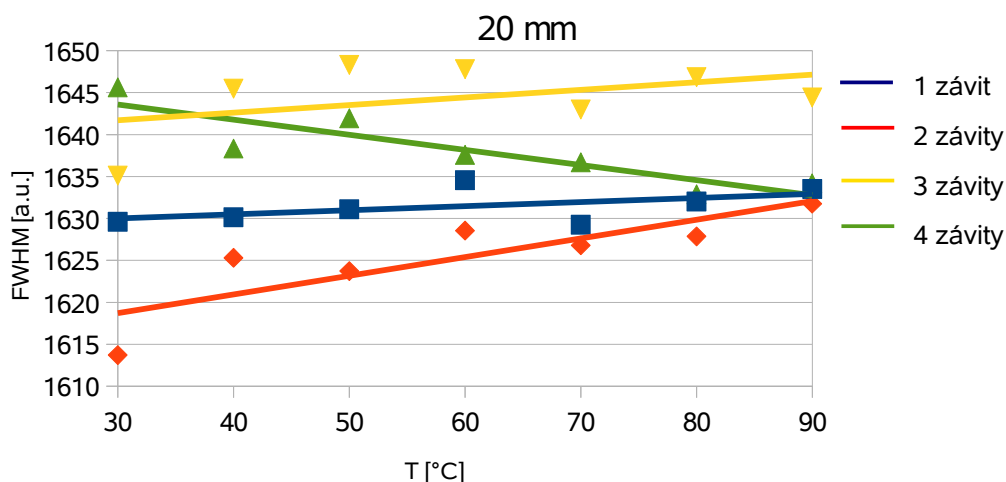
Obrázek 5.12: Profily svazku v ose x jednovídnového vlákna (1550 nm) při zahřívání, 1 závit na 25mm

### 5.3 FWHM 1550 nm

Následující grafy zobrazují sumarizované výsledky všech měření FWHM svazků. V grafu jsou porovnávány změny FWHM mezi jedním až čtyřmi počty závitů zakřiveného vlákna. Hodnoty FWHM jsou změřené aplikací dodávanou k měřicímu přístroji. V grafech jsou zahrnuty hodnoty měřené v osách, ve kterých se nejvíce projevila teplotní závislost. U grafů 15 mm a 20 mm (Obrázek 5.13, Obrázek 5.14) lze pozorovat i přes drobná kolísání rostoucí charakter měřené veličiny. Drobná kolísání jsou způsobena šumem, který byl nasuperponován na měřeném profilu. Nárůst FWHM se pohybuje okolo 10  $\mu\text{m}$ . Nárůst není tak velký, jak se může zdát z grafů profilů, protože se měří v polovině amplitudy a změny jsou opticky nejpatrnější v horní části profilu.

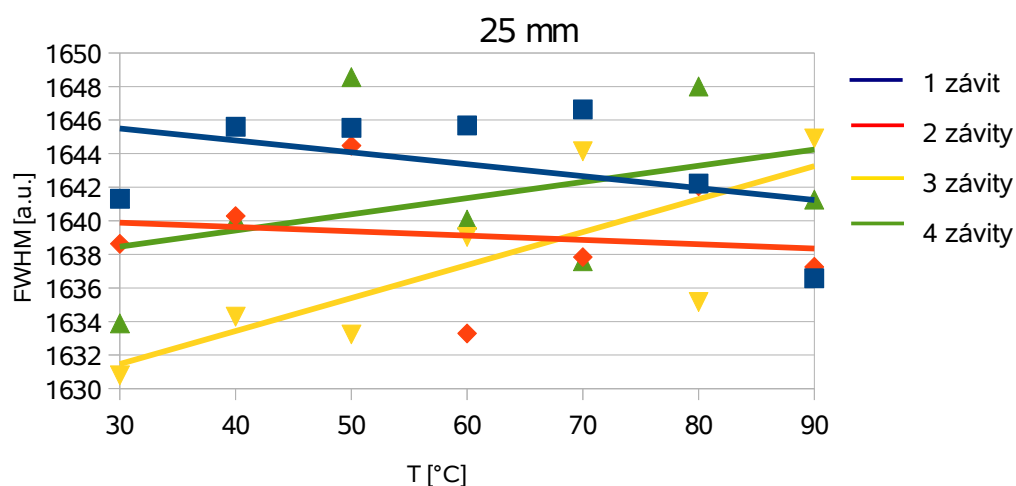


Obrázek 5.13: Průměr svazku v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závitů na průměru 15 mm (1550 nm)

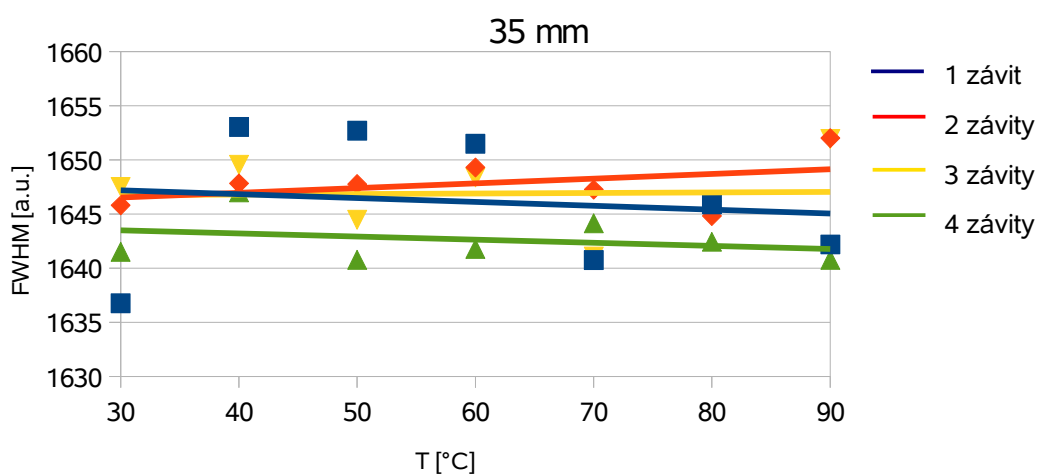


Obrázek 5.14: Průměr svazku v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závitů na průměru 20 mm (1550 nm)

Průběh FWHM u větších průměrů zakřivení se odlišuje, na grafech ( Obrázek 5.15, Obrázek 5.16) je vidět značné kolísání naměřených hodnot. Nedošlo k jednoznačnému zvětšování průměru svazku. Změny jsou příliš utopeny v šumu.



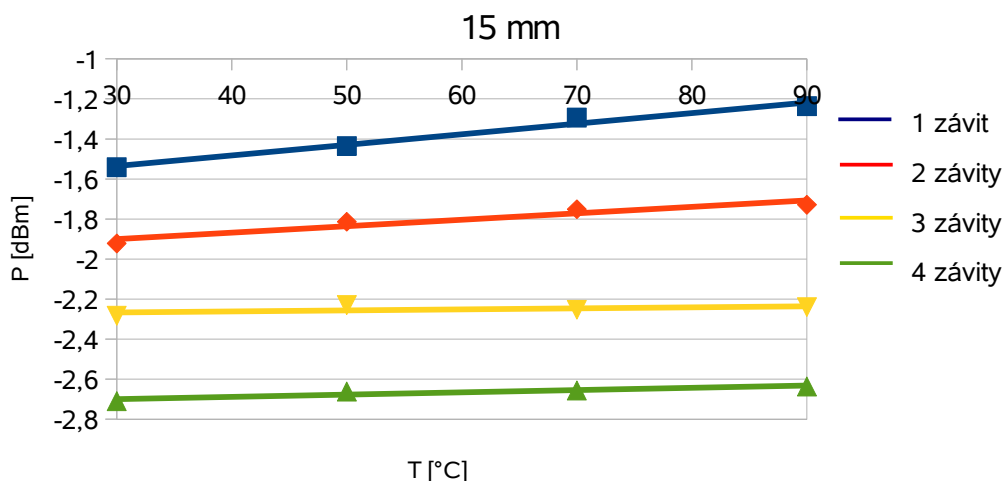
Obrázek 5.15: Průměr svazku v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závity na průměru 25 mm (1550 nm)



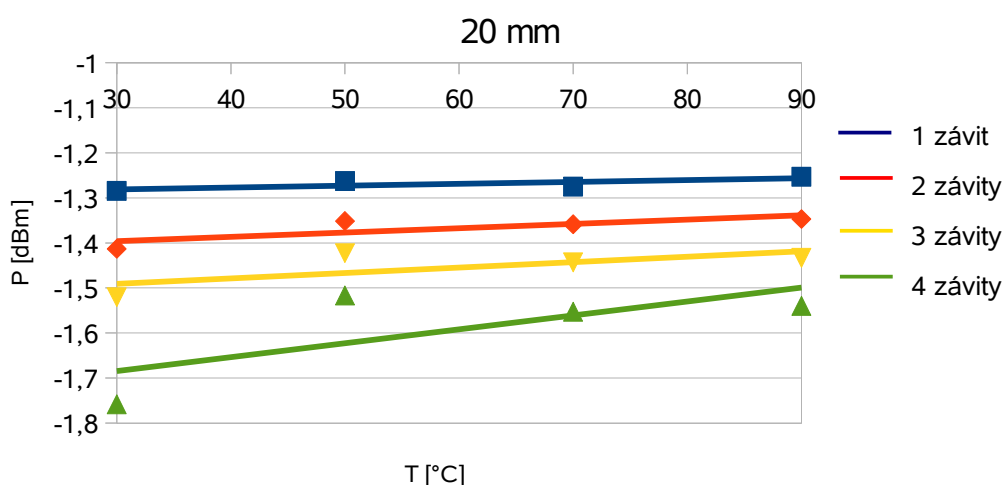
Obrázek 5.16: Průměr svazku v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závity na průměru 35 mm (1550 nm)

## 5.4 Výkon ve vláknu 1550 nm

Následující grafy znázorňují průběhy výkonu během zahřívání vlákna naměřené měřičem výkonu. Z grafů je vidět mírný nárůst výkonu v řádu desetin decibelů, který je nejpatrnější při zakřivení vlákna 15 mm (Obrázek 5.17). U ostatních zakřivení není nárůst téměř žádný. Toto chování příliš nekorresponduje s naměřenými průběhy profilů, kdy amplituda s teplotou rostla. Vysvětlit to lze dvěma způsoby. Jako první se nabízí nedostatečná přesnost měřicího přístroje, která byla u použitého přístroje OPM4  $\pm 0,25$  dB ( $\pm 6\%$ ). Druhým možným vysvětlením je, že ačkoliv došlo ke zvýšení amplitudy profilu, nemuselo ještě nutně dojít ke zvýšení výkonu, ale pouze ke změně tvaru svazku.

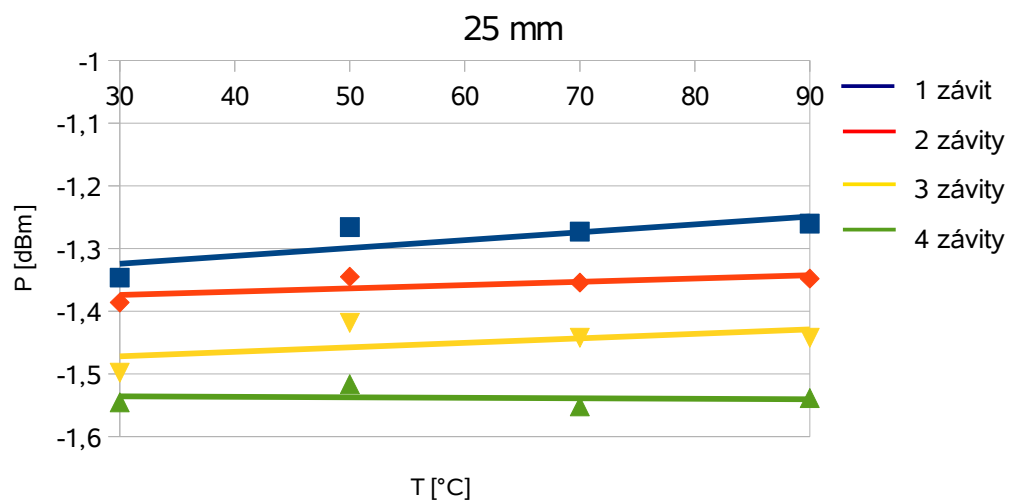


Obrázek 5.17: Naměřený výkon v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závitů na průměru 15 mm (1550 nm)

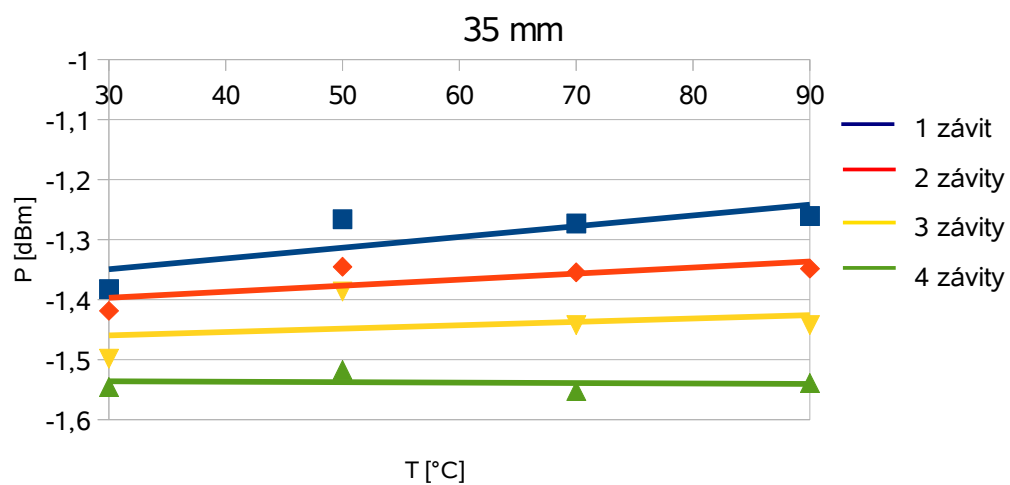


Obrázek 5.18: Naměřený výkon v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závitů na průměru 20 mm (1550 nm)





Obrázek 5.19: Naměřený výkon v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závity na průměru 25 mm (1550 nm)

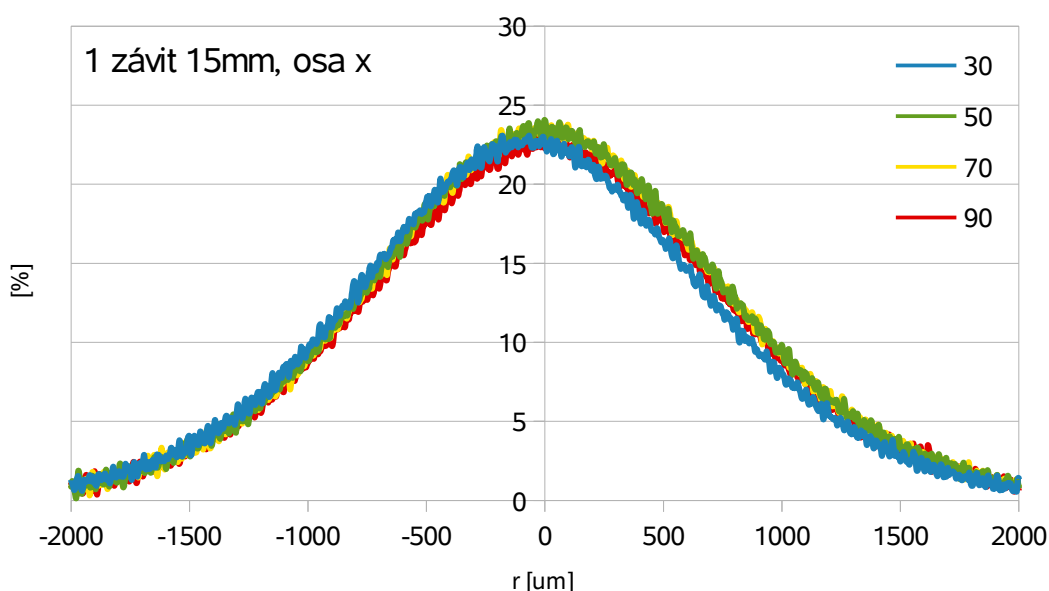


Obrázek 5.20: Naměřený výkon v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závity na průměru 35 mm (1550 nm)

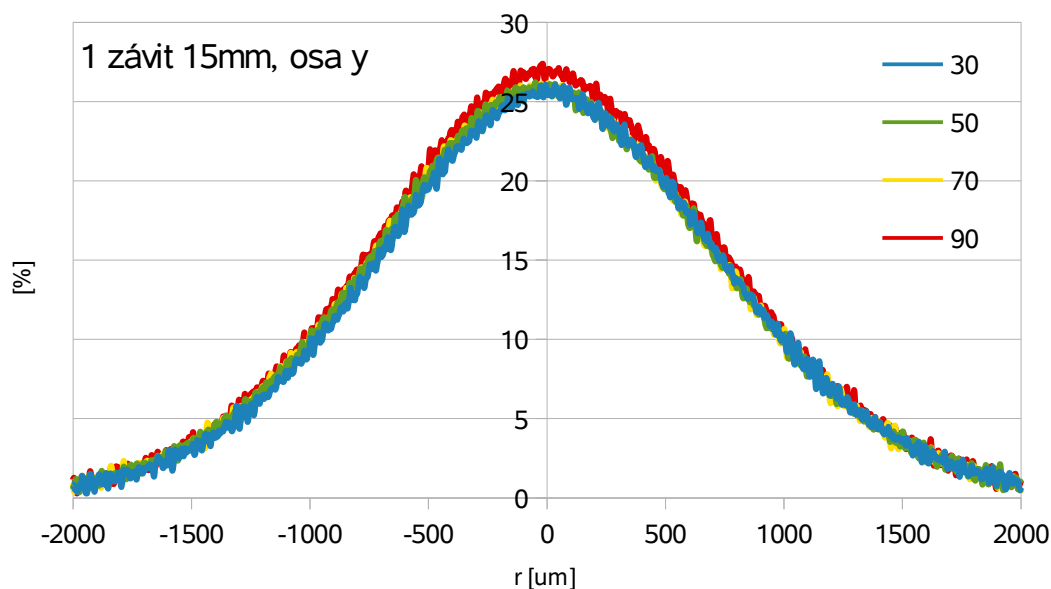
## 5.5 Profil svazku 1310 nm

Při zahřívání zakřiveného vlákna, tentokrát na vlnové délce 1310 nm, lze opět pozorovat změny profilu svazku při nárůstu teploty. Na prvních dvou grafech (Obrázek 5.21, Obrázek 5.22) je vidět že došlo k mírnému nárůstu, který se více projevil v ose y. U profilu v ose x stojí za povšimnutí posuv svazku mimo střed osy spolu s rostoucí teplotou. Toto chování může být způsobeno tím, že při zakřivení došlo k vytlačení vedeného vidu mimo osu vlákna směrem k vnějšímu plášti. Tento jev se neprojevil vždy, důvodem mohlo být podélné zkroucení vlákna při namotávání na trubku.

Z důvodu nedostatku času a nedostupnosti laboratorního vybavení probíhalo měření v krocích po 20°C.

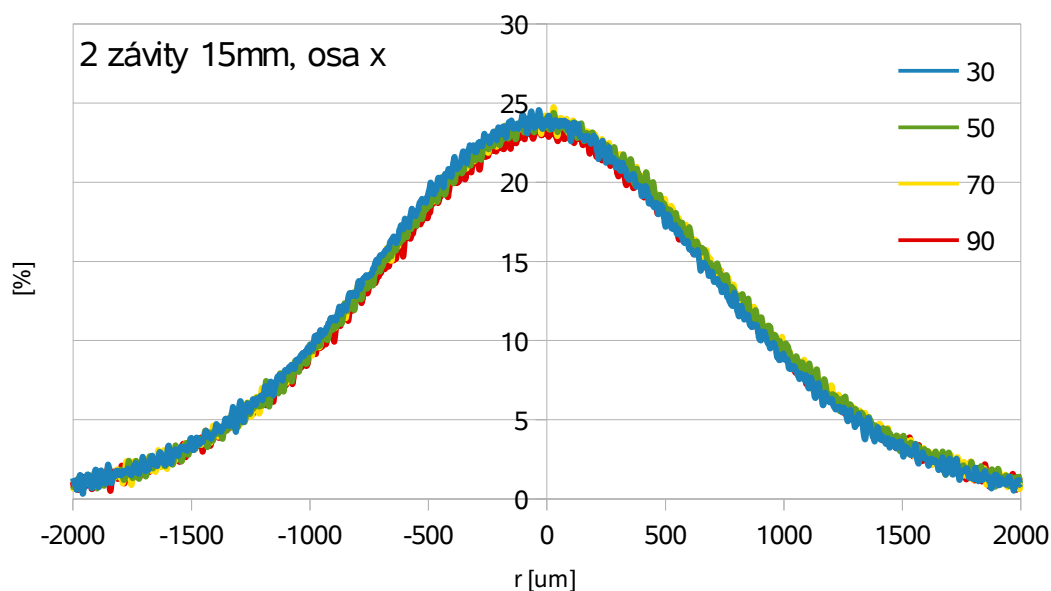


Obrázek 5.21: Profily svazku v ose x jednovidového vlákna (1310 nm) při zahřívání, 1 závit na 15mm

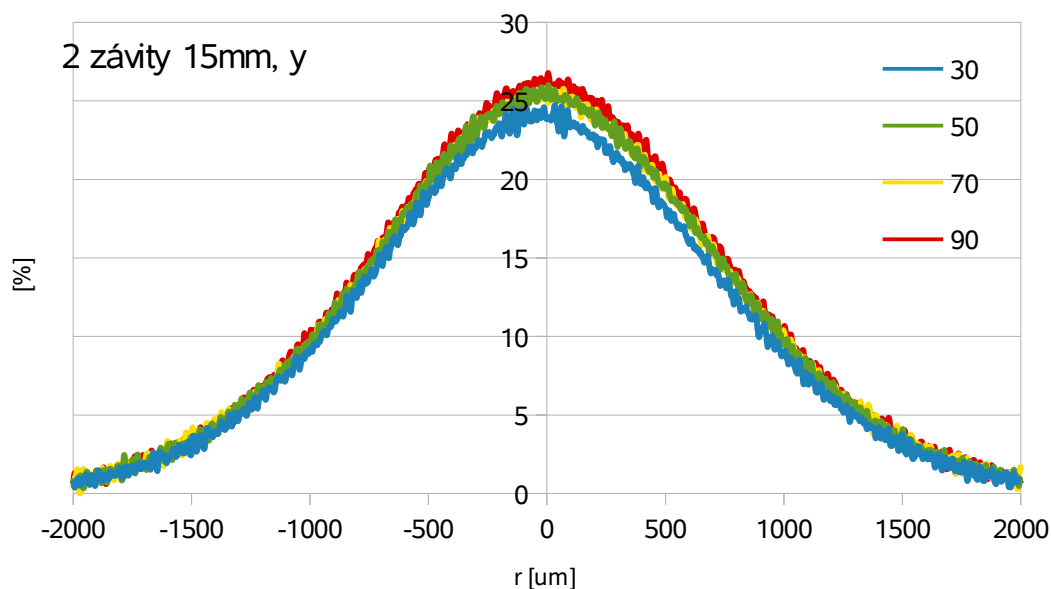


Obrázek 5.22: Profily svazku v ose y jednovírového vlákna (1310 nm) při zahřívání, 1 závit na 15mm

Následující dva grafy (Obrázek 5.23, Obrázek 5.24) zobrazují situaci při dvou závitech. Zde v ose x nedošlo k téměř žádné změně, pouze k mírnému posunu. Naopak v ose y došlo se zvýšením teploty k nárůstu amplitudy a k posuvu středu svazku směrem doprava. Ve srovnání s měřeními při jednom závitě došlo k oběma jevům v opačných osách, toto chování opět naznačuje spojitost se změnou zakřivení vlákna.

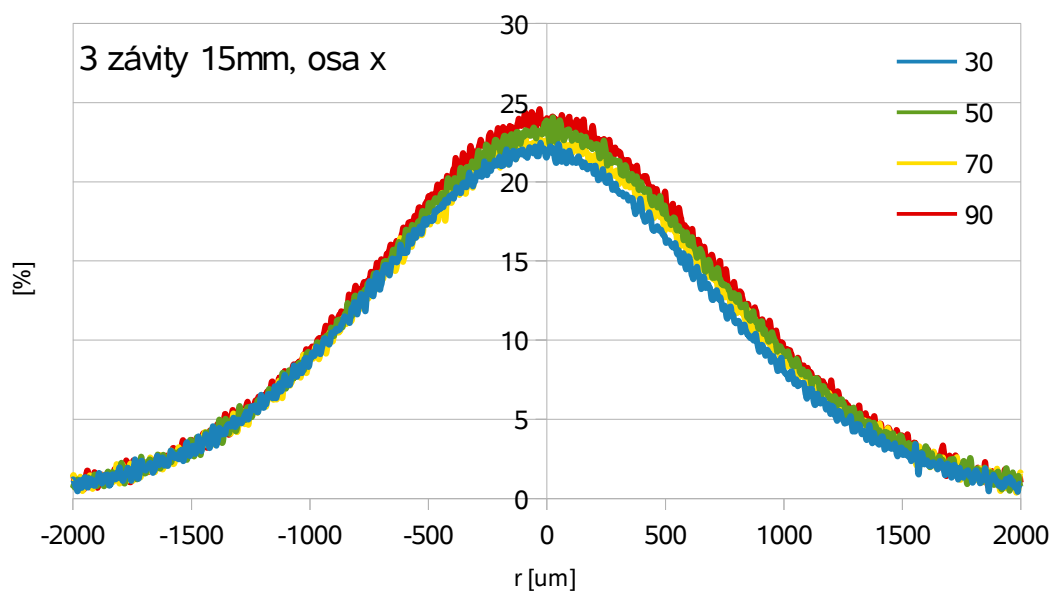


Obrázek 5.23: Profily svazku v ose x jednovírového vlákna (1310 nm) při zahřívání, 2 závity na 15mm

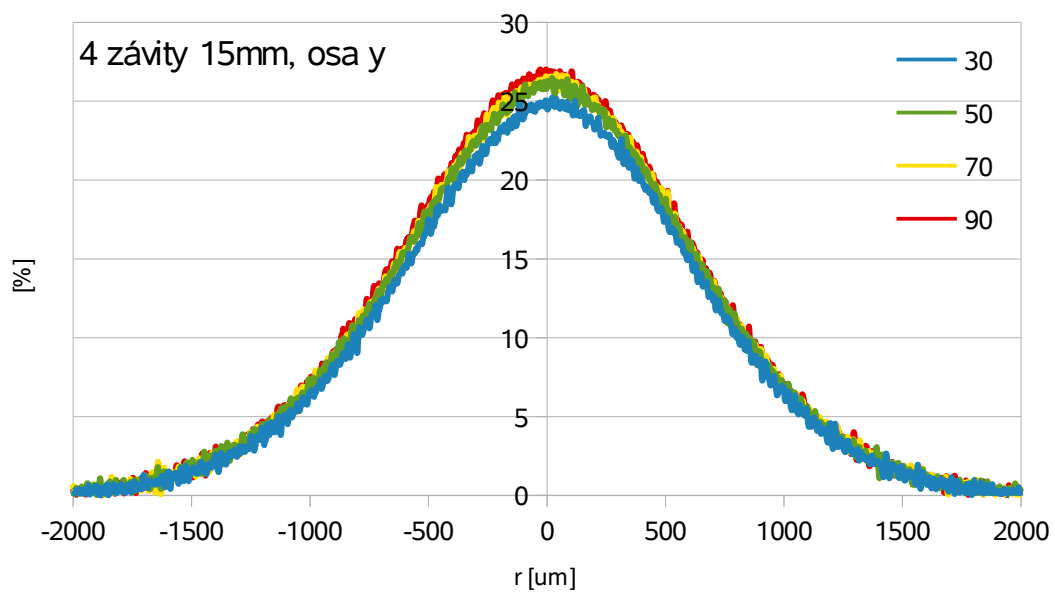


Obrázek 5.24: Profily svazku v ose y jednovidového vlákna (1310 nm) při zahřívání, 2 závitů na 15mm

Pro úplnost jsou na následujících grafech (Obrázek 5.25, Obrázek 5.26) zobrazeny zbývající profily naměřené při zakřivení 15 mm. Byly vybrány profily v osách, kde se nejvíce projevila teplotní závislost. Všimněte si pravidelného střídání os x a y u nichž došlo k posuvu svazku mimo střed, což lze vysvětlit postupnou změnou počtu závitů vlákna.



Obrázek 5.25: Profily svazku v ose x jednovidového vlákna (1310 nm) při zahřívání, 3 závitů na 15mm

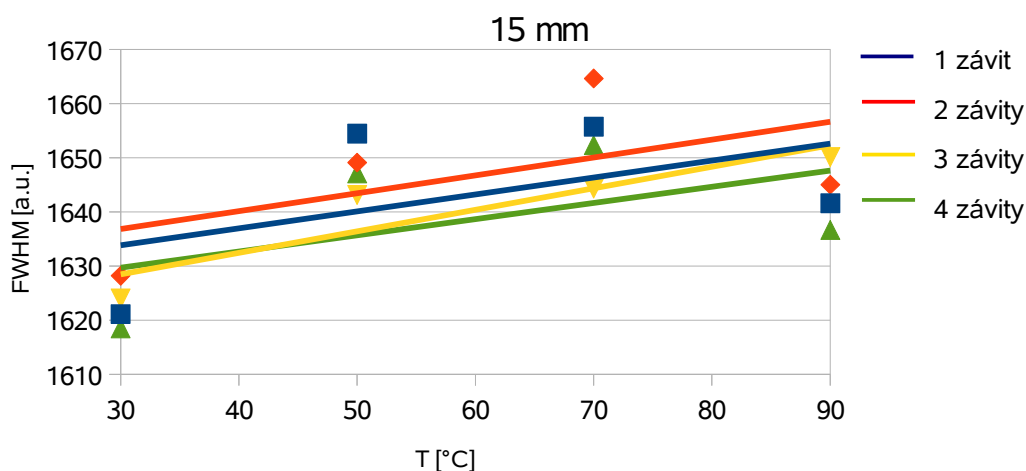


Obrázek 5.26: Profily svazku v ose y jednovidového vlákna (1310 nm) při zahřívání, 2 závity na 15mm

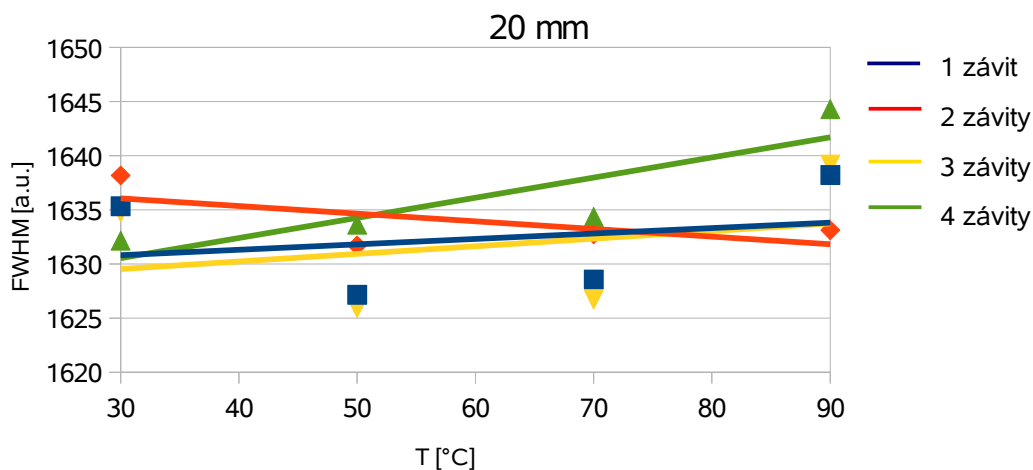
Profily měřené na ostatních průměrech zakřivení a osách jsou přiloženy v elektronické příloze. Průběhy profilu jsou podobné, ale změny průměru svazku amplitudy a posun mimo střed osy se neprojevují ve stejných intenzitách a při stejných počtech závitů.

## 5.6 FWHM 1310 nm

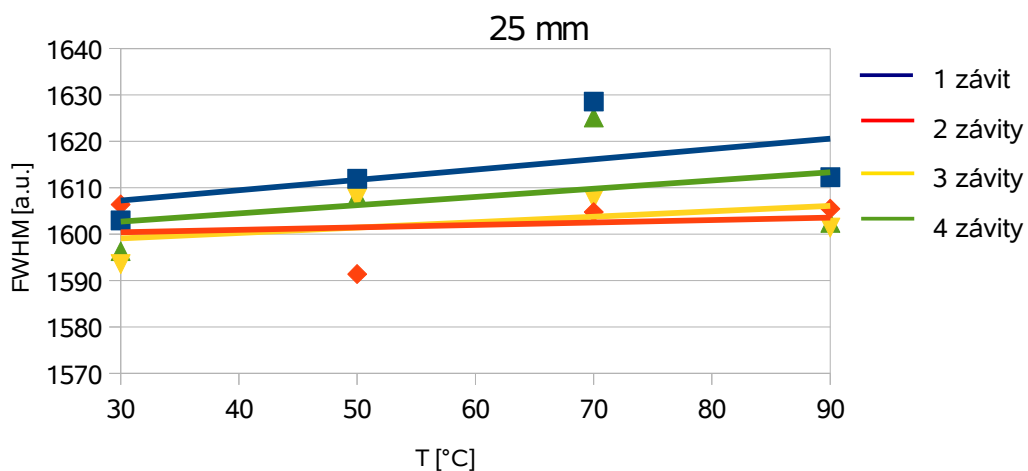
Následující grafy zobrazují sumarizované výsledky všech měření FWHM svazků stejným způsobem, jako je tomu bylo u 1550 nm. Opět lze pozorovat, i když v menší míře, rostoucí tendenci FWHM. Například, při zakřivení vlákna 15 mm (Obrázek 5.27), lze pozorovat růst FWHM až k teplotě 70 °C, kde došlo opět k poklesu. Naopak při 20 mm (Obrázek 5.28) nebylo zaznamenáno zvětšení FWHM. Tyto výkyvy jsou s největší pravděpodobností způsobeny šumem obsaženým v měřeném signálu.



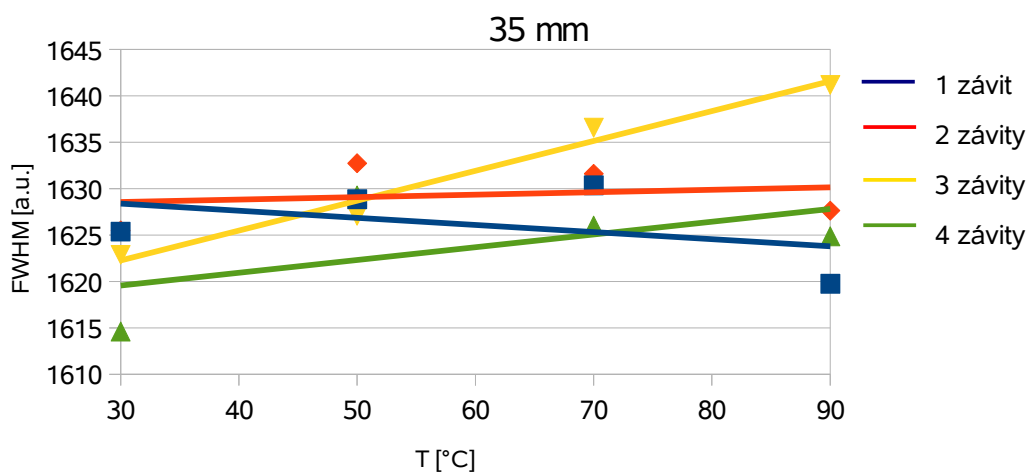
Obrázek 5.27: Průměr svazku v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závity na průměru 15 mm (1310 nm)



Obrázek 5.28: Průměr svazku v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závity na průměru 20 mm (1310 nm)



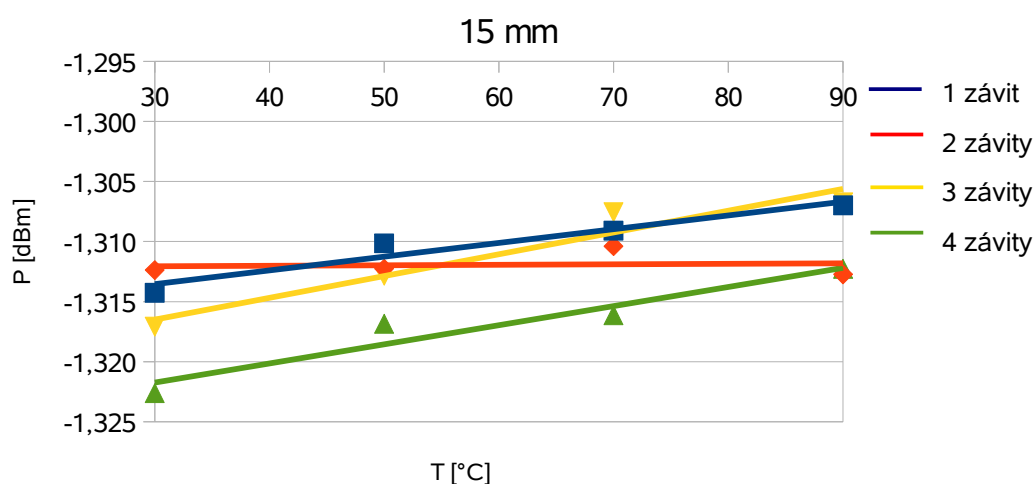
Obrázek 5.29: Průměr svazku v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závity na průměru 25 mm (1310 nm)



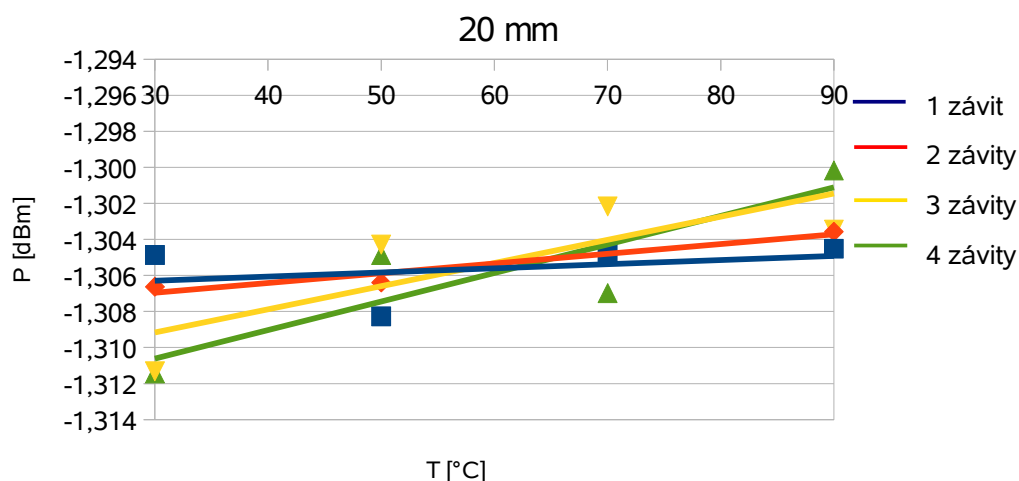
Obrázek 5.30: Průměr svazku v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závity na průměru 35 mm (1310 nm)

## 5.7 Výkon ve vláknu 1310 nm

Následující grafy opět znázorňují sumarizované průběhy výkonu během zahřívání vlákna naměřené měřičem výkonu. Výsledky se mezi jednotlivými průměry zakřivení téměř neliší. Došlo k nepatrnému nárůstu v setinách až desetinách dB. Je však zapotřebí vzít v úvahu přesnost použitého měřicího přístroje (OPM4), která je  $\pm 0,25$  dB ( $\pm 6\%$ ) a je menší než detekovaná změna.

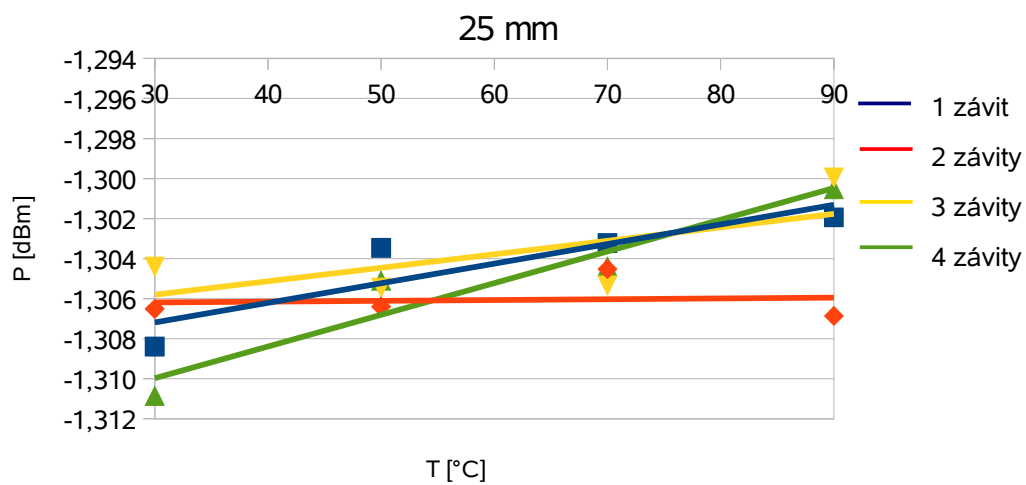


Obrázek 5.31: Naměřený výkon v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závity na průměru 15 mm (1310 nm)

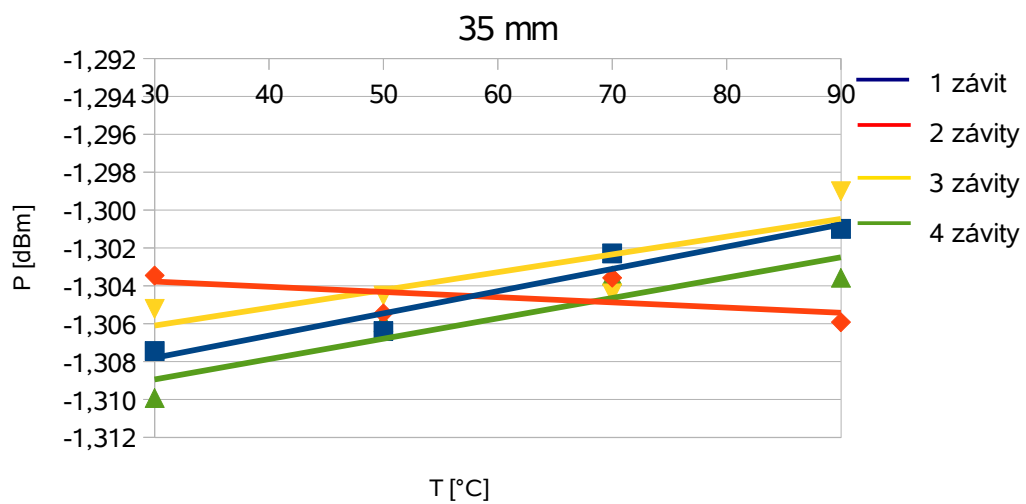


Obrázek 5.32: Naměřený výkon v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závity na průměru 20 mm (1310 nm)





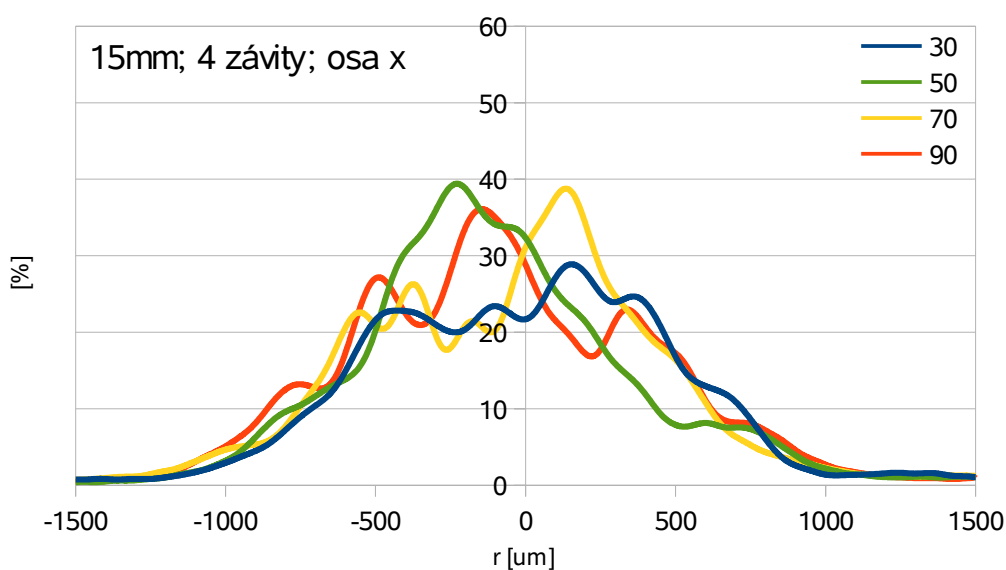
Obrázek 5.33: Naměřený výkon v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závitů na průměru 25 mm (1310 nm)



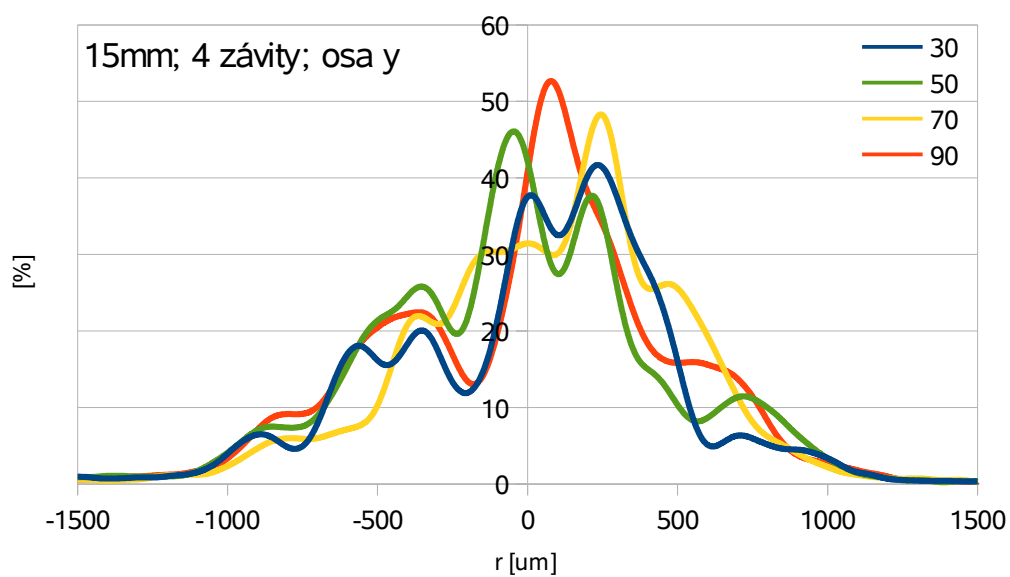
Obrázek 5.34: Naměřený výkon v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závitů na průměru 35 mm (1310 nm)

## 5.8 Profil svazku 974 nm

Na grafech (Obrázek 5.35, Obrázek 5.36) jsou zobrazeny profily mnohavidového vlákna. Na první pohled je patrná přítomnost několika maxim a značný rozdíl mezi tvarem profilu v osách x a y. Během zvyšování teploty došlo ke změně tvaru profilů v obou osách. Změny nelze jednoduše popsat změnou průměru a amplitudy, jako tomu bylo v případě jednovidových vláken, ale jako celkovou změnu tvaru profilu způsobenou změnou rozložení vidů ve vlákne. (2D grafy intenzity zobrazující rozložení vidů při zahřívání jsou přiloženy v příloze Příloha C). Nárůst amplitudy, který je vidět v profilu osy y, se projevil pouze v tomto jediném případě. V ostatních případech byly změny amplitudy nahodilé. Vzhledem k proměnlivosti výsledků při zakřivení vlákna 15 mm, z kterých nelze stanovit teplotní závislost, bylo měření omezeno pouze na průměr 15 mm od jednoho do čtyř závitů. Průměr 15 mm byl zvolen z důvodu největšího vlivu ohybu.



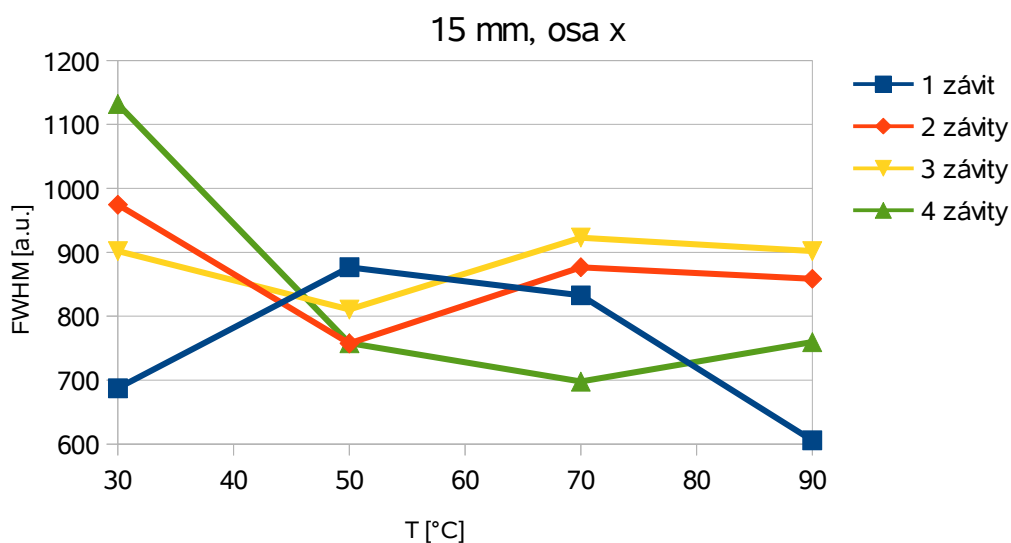
Obrázek 5.35: Profily svazku v ose x mnohavidového vlákna (974 nm) při zahřívání, 4 závitů na 15mm



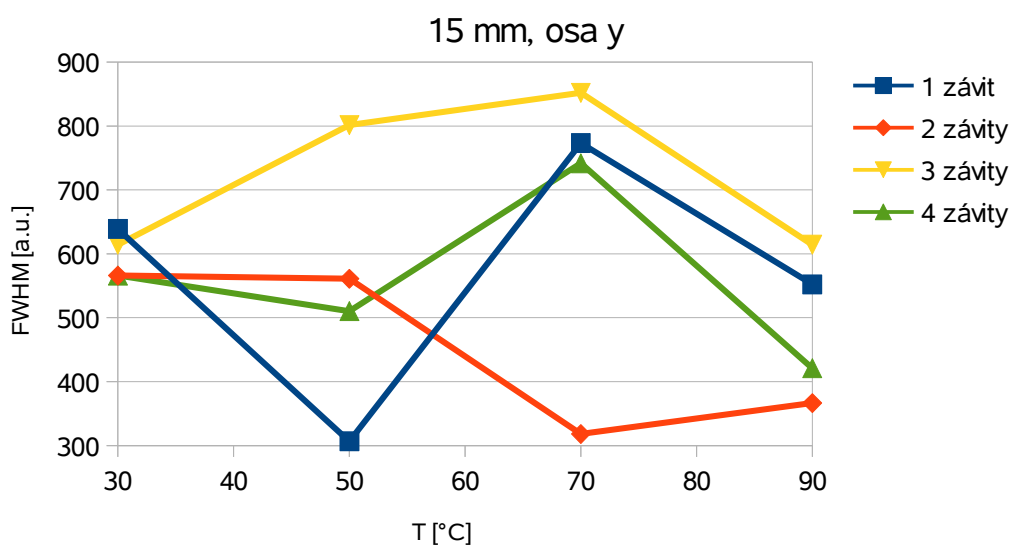
Obrázek 5.36: Profily svazku v ose y mnohavidového vlákna (974 nm) při zahřívání, 4 závity na 15mm

## 5.9 FWHM 974 nm

Průměr svazku naměřený na výstupu z mnohavidového vlákna v závislosti na teplotě nemá ani rostoucí ani klesající charakter. Rozptyl hodnot je značný, například v grafu (Obrázek 5.37) je při čtyřech závitech rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší naměřenou hodnotou FWHM přes 300 um. Tyto výsledky vyplývají z průběhu profilů, kdy jednotlivá výkonová maxima mění svůj tvar a posouvají se v prostoru. Nelze pozorovat ani žádnou korelaci mezi osami x a y.



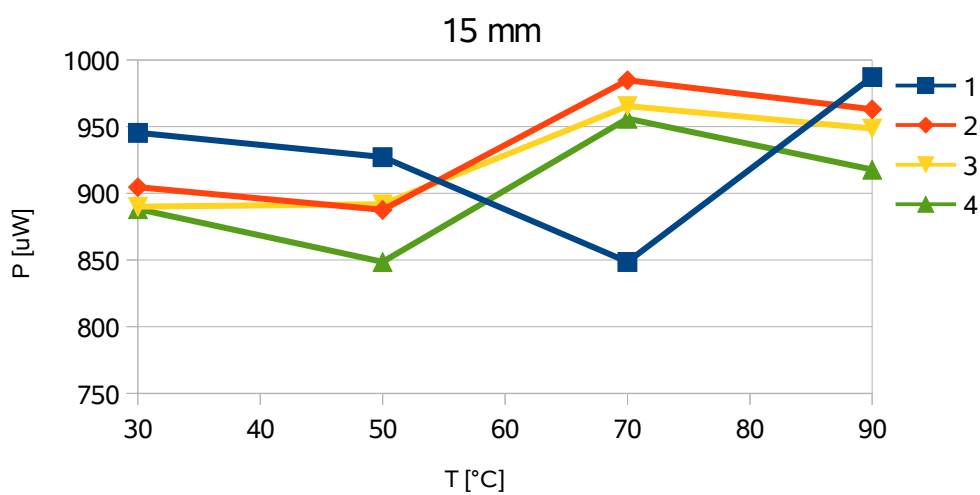
Obrázek 5.37: Průměr svazku v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závity na průměru 15 mm (974 nm, osa x)



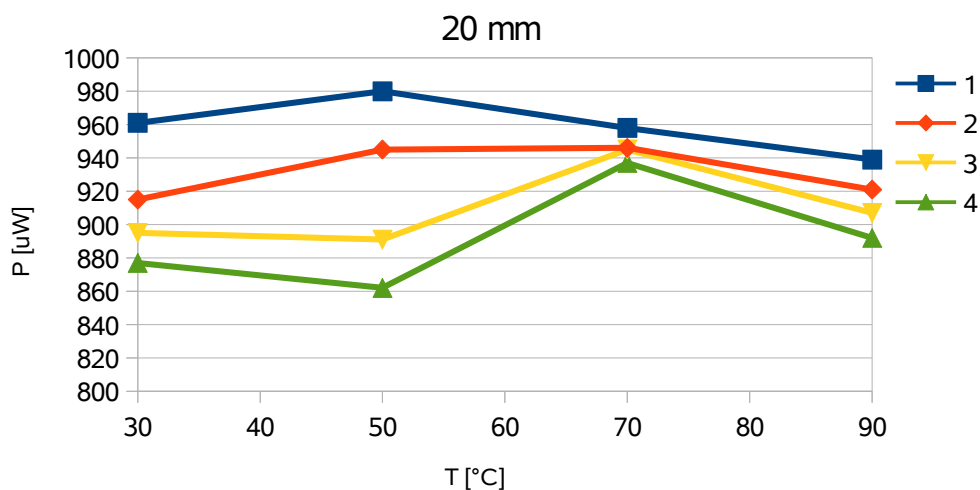
Obrázek 5.38: Průměr svazku v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závity na průměru 15 mm (974 nm, osa y)

## 5.10 Výkon ve vláknu 974 nm

Z průběhu výkonu, v závislosti na zvyšující se teplotě, nelze jednoznačně říci, že došlo k nárůstu nebo poklesu naměřeného výkonu. Na druhou stranu lze pozorovat značnou fluktuaci hodnot naměřenou při různých teplotách, což indikuje, že s teplotou dochází ke změnám vlnovodných vlastností vlákna. Zde byly ještě výsledky rozšířeny o měření na zakřivení 20 mm, ale výsledky jsou obdobné.



Obrázek 5.39: Naměřený výkon v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závitů na průměru 15 mm (974 nm)



Obrázek 5.40: Naměřený výkon v závislosti na teplotě pro 1 až 4 závitů na průměru 20 mm (974 nm)

## 6 Závěr

V teoretické části se předpokládalo, že s rostoucí teplotou dojde ke zvětšení numerické apertury vlákna. Toto tvrzení se potvrdilo na základě změřených profilů svazku jednovidového vlákna, kdy došlo při měření na malých průměrech zakřivení (15 mm a 20 mm) ke zvětšení profilu svazku a FWHM. Zároveň se zvětšením NA došlo k nárůstu amplitudy profilu. Ke změnám docházelo v jedné rovině řezu profilu, v druhé se teplotní závislost neprojevila vůbec, nebo jen ve slabší míře. Toto chování je zřejmě způsobeno ohybem vlákna, jelikož při změně počtu závitů docházelo i ke střídání os, v nichž se teplotní závislost projevila. Pozorovaný nárůst FWHM se při změnách teploty od 30 °C do 90 °C pohyboval mezi 10 až 20  $\mu\text{m}$ , nárůsty amplitudy byly okolo 5%. Při měření průběhu výkonu ve vlákně byl zaznamenán mírný nárůst výkonu na zakřivení 15 mm v řádu desetin decibelů. Na větších průměrech zakřivení došlo vlivem menšího vyvázání světla do pláště k zeslabení teplotně závislých jevů.

Výše uvedené závěry jsou vztaženy k vlnové délce 1550 nm, při které byl vliv teploty na přenosové parametry vlákna nejsilnější. Při měření na vlnové délce 1310 nm, došlo opět ke zvětšování profilu svazku, což ukazuje na zvětšující se NA. Navíc bylo pozorováno, že zvyšováním teploty dochází k posunutí svazku mimo střední osu vlákna. Nárůst FWHM byl i zde, ale ne tak zřetelný jako v případě 1550 nm. Z hlediska průběhu výkonu byla sice zaznamenána tendence růstu, ale řádově se pohybovala v tisících decibelů, což vzhledem k přesnosti měřicího přístroje  $\pm 0,25$  dB nelze považovat za průkazné.

Výsledky měření na mnohavidovém vlákně (vlnová délka 974 nm) ukázaly, že sice dochází se změnou teploty ke změně distribuce vidů ve vlákně, ale zároveň se ukázalo, že nelze tyto změny popsat na základě měření FWHM a výkonu, protože tyto změny mají nepravidelný průběh.

Očekávané oscilace útlumu nebylo možné zaznamenat z důvodu nízké přesnosti přístrojů. Rovněž se nepodařilo z důvodu malé přesnosti přístrojů získat potřebná data o teplotní závislosti změny útlumu a nelze tedy navrhnout konkrétní požadavky pro případný návrh měřící hlavičky.

Z hlediska dalšího vývoje bych doporučil se soustředit na zpřesnění výsledků průběhů výkonů v závislosti na teplotě, použitím stabilnějšího laserového zdroje a přesnějšího měřiče výkonu. Dále se velice zajímavým, z hlediska dalšího zkoumání, jeví chování mnohavidových vláken, která jsou citlivá nejen na teplotu ale i na pohyb. Ale pro jejich zkoumání je třeba navrhnout jiný způsob měření, více soustředěný na sledování změny rozložení vedených vidů.

## 7 Použitá literatura

- [1] MICHAEL BASS, Editor-in-chief, Virendra N.associate editor VIRENDRA N. MAHAJAN a Francis T YU. Handbook of optics. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2010, 477 s. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.), 132. ISBN 978-007-1629-256.
- [2] YIN, Shizhuo, Paul B RUFFIN a Francis T YU. Fiber optic sensors. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, c2008, 477 s. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.), 132. ISBN 14-200-5365-5.
- [3] MICHAEL BASS, Editor-in-chief, Virendra N.associate editor VIRENDRA N. MAHAJAN a Francis T YU. Fiber Optic Smart Structures. 1st ed. New York: Wiley, 1994, 671 s. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.), 132. ISBN 04-715-5448-0.
- [4] HILL, K.O.; MELTZ, G.; , "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," Lightwave Technology, Journal of , vol.15, no.8, pp.1263-1276, Aug 1997
- [5] BHATIA, V.; BURFORD, M.K.; MURPHY, K.A.; VENGSARKAR, A.M.; , "Long-period fiber grating sensors," Optical Fiber Communications, 1996. OFC '96 , vol., no., pp. 265- 266, 25 Feb.-1 March 1996 doi: 10.1109/OFC.1996.908281
- [6] XUEWEN SHU; ALLSOP, T.; GWANDU, B.; LIN ZHANG; BENNION, I.; , "High-temperature sensitivity of long-period gratings in B-Ge codoped fiber," Photonics Technology Letters, IEEE, vol.13, no.8, pp.818-820, Aug. 2001 doi: 10.1109/68.935814
- [7] JAMES, S.W.; KHALIQ, S.; TATAM, R.P.; , "Enhanced sensitivity fibre optic long period grating temperature sensor," Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002. Ofs 2002, 15th, vol., no., pp. 139- 142 vol.1, 2002 doi: 10.1109/OFS.2002.1000521
- [8] GIFFORD, D.K.; SOLLER, B.J.; WOLFE, M.S.; FROGGATT, M.E.; , "Distributed fiber-optic temperature sensing using Rayleigh backscatter," Optical Communication, 2005. ECOC 2005. 31st European Conference on , vol.3, no., pp. 511- 512 vol.3, 25-29 Sept. 2005

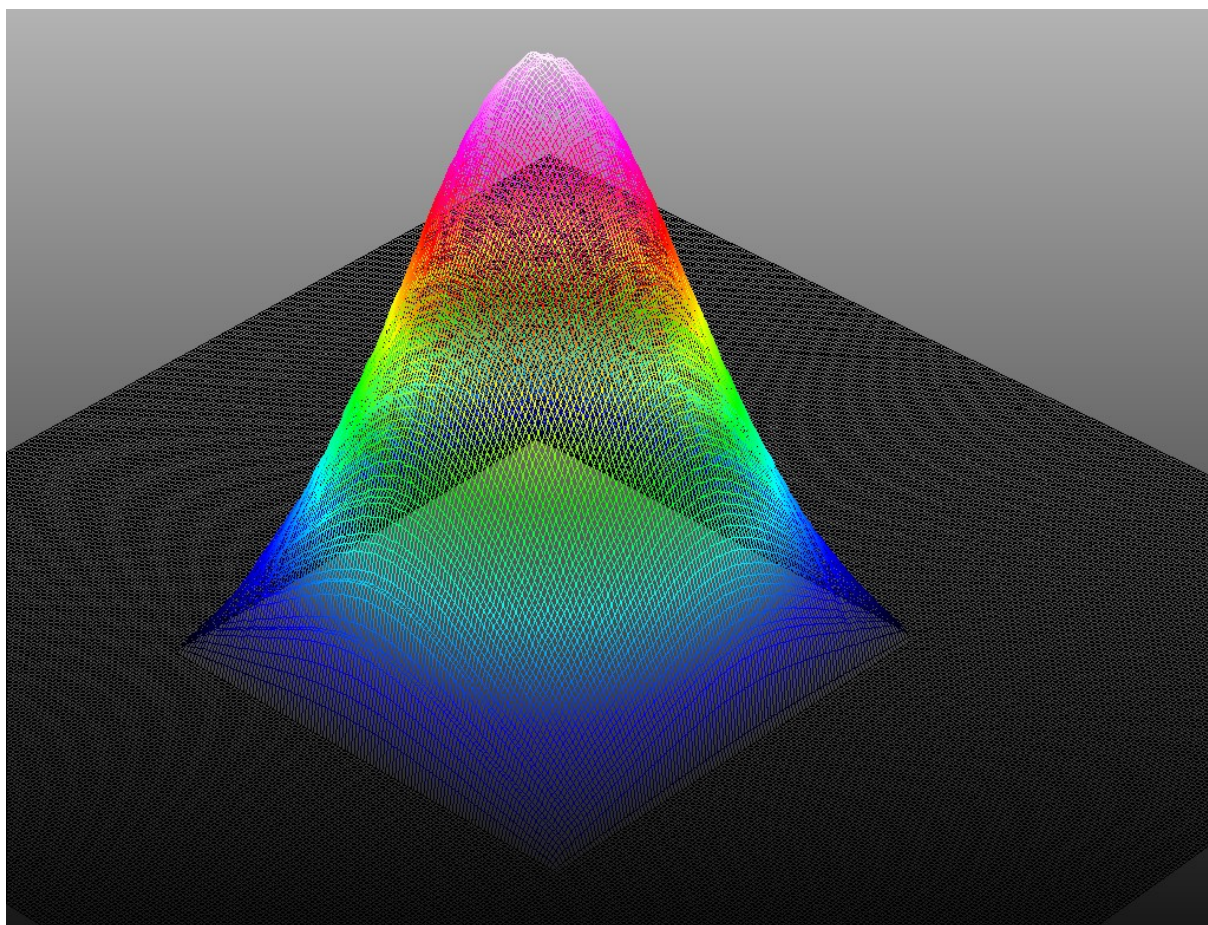
- [9] P. KOUDELKA, B. PETRUJOVA, J. LATAL, F. HANACEK, P. SISKÁ, J. SKAPA, V. VASINEK; "Optical Fiber Distributed Sensing System Applied in Cement Concrete Commixture Research" *Radioengineering* 2010, vol. 19, č. 1, s. 172-177.
- [10] RENNER, H.; , "Bending losses of coated single-mode fibers: a simple approach," *Lightwave Technology, Journal of*, vol.10, no.5, pp.544-551, May 1992doi: 10.1109/50.136086
- [11] FAUSTINI, L.; MARTINI, G.; , "Bend loss in single-mode fibers," *Lightwave Technology, Journal of*, vol.15, no.4, pp.671-679, Apr 1997 doi: 10.1109/50.566689
- [12] ANANDKUMAR S. LALASANGI, VIJAY K. KULKARNI, I. I. PATTANSHETTI, U. S. RAIKAR, Bend induced loss in single mode fiber for designing simple interferometric temperature sensor, *Journal Of Optoelectronics And Advanced Materials* Vol. 8, No. 5, October 2006, p. 1901 - 1904
- [13] GHOSH, GORACHAND. Handbook of thermo-optic coefficients of optical materials with applications. San Diego, Calif.: Academic Press, c1998, 325 s. ISBN 01-228-1855 5.



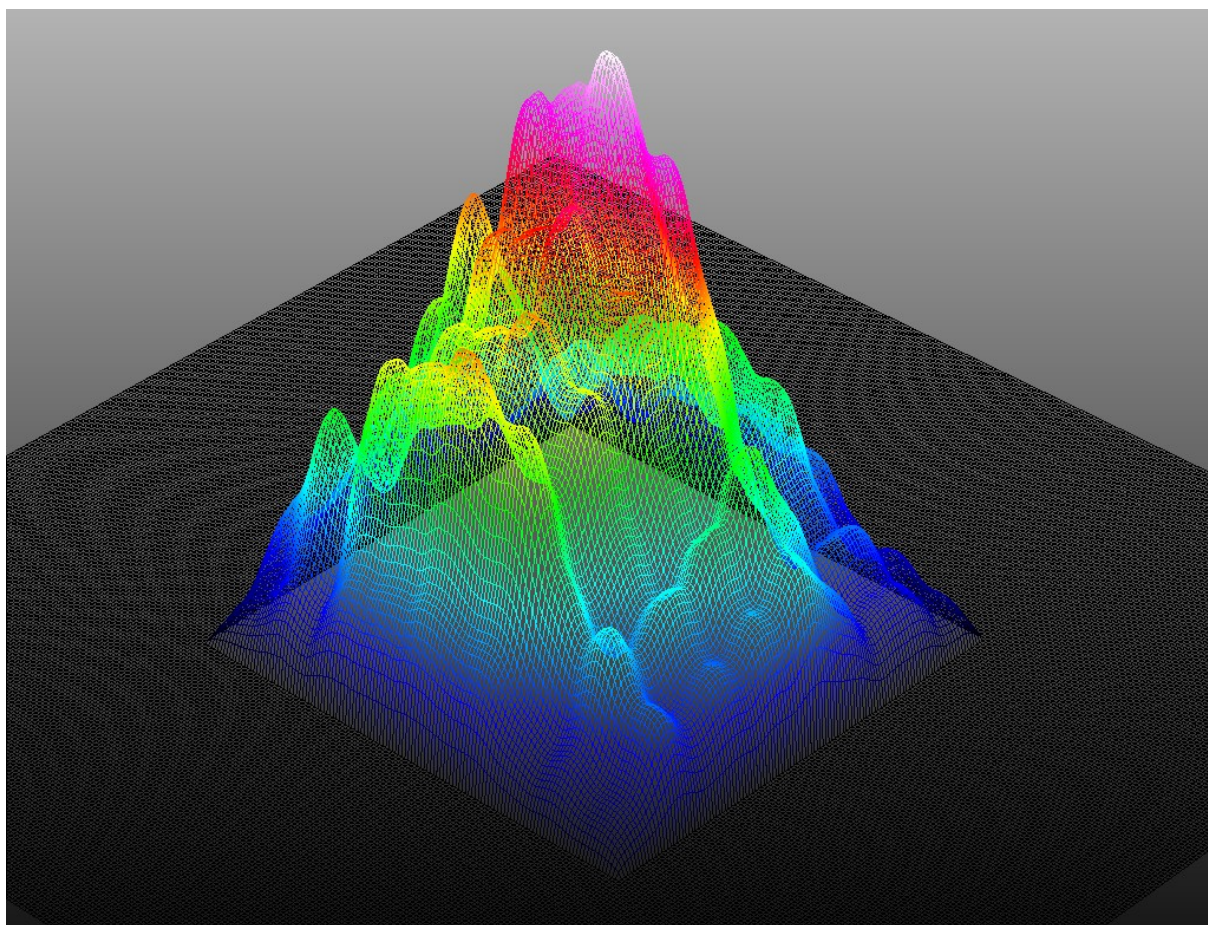
## 8 Přílohy

### Seznam příloh

Příloha : 3D model svazku vystupujícího z vlákna (1550 nm ).....	2
Příloha B: 3D model svazku vystupujícího z vlákna (974 nm).....	3
Příloha : 2D grafy intenzity mnohavidového vlákna při zahřívání od 30 °C do 90 °C.....	4
Příloha : Adresářová struktura přiloženého DVD.....	5

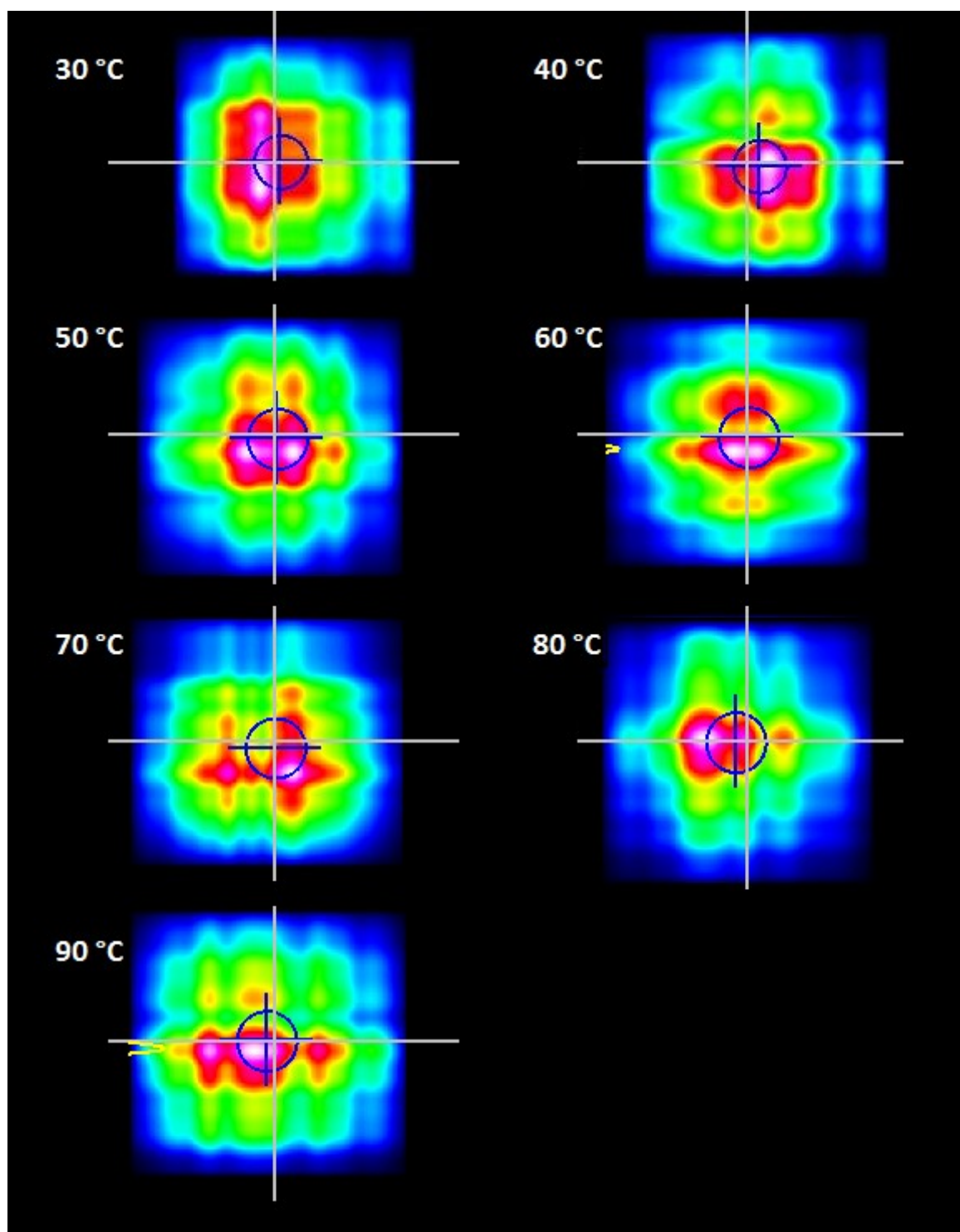


*Příloha A: 3D model svazku vystupujícího z vlákna (1550 nm )*



*Příloha B: 3D model svazku vystupujícího z vlákna (974 nm)*





*Příloha C: 2D grafy intenzity mnohavidového vlákna při zahřívání od 30 °C do 90 °C*

/data_profil	naměřená data – měření profilu svazku
/data_vykon	naměřená data – měření výkonu
/grafy	grafy sestavené z naměřených dat
/texty	soubory s textem práce, zadání, klíčová slova a abstrakt

*Příloha D: Adresářová struktura přiloženého DVD*